

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Svibor Pavetić

Zagreb, 2008.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Voditelj rada:

Prof. dr. sc. Mirko Husnjak

Svibor Pavetić

Zagreb, 2008.

Sadržaj

Sažetak.....	I
Popis slika.....	II
Popis oznaka.....	V
Zahvala.....	VI
1. Uvod.....	1
2. Numerički proračun nosača kabine u statičkom režimu rada.....	2
2.1. Izrada 3D modela.....	2
2.2. Metoda konačnih elemenata.....	3
2.3. Opterećenje nosača i rubni uvjeti.....	4
2.4. Naprezanja u nosaču kabine.....	8
3. Simulacija pukotine.....	12
3.1. Proces loma pri cikličkom opterećenju.....	12
3.2. Definiranje modela za simulaciju pukotine.....	29
3.3. Definiranje varijabli u programskom paketu AFGROW.....	31
3.3.1. Inicijalna pukotina kvadratnog poprečnog presjeka.....	35
3.3.2. Inicijalna pukotina pravokutnog poprečnog presjeka u aksijalnom smjeru.....	38
3.3.3. Inicijalna pukotina pravokutnog poprečnog presjeka u radijalnom smjeru.....	41
3.3.4. Inicijalna pukotina uzduž cijelog ruba provrta.....	44
3.3.5. Realno opterećenje ovjesišta.....	47
4. Zaključak.....	48
5. Popis literature.....	49

Sažetak

Predmet rada je numeričko ispitivanje pouzdanosti nosača kabine žičare ZET-a.

Programskim paketom ALGOR koji koristi metodu konačnih elemenata ispitivana je pouzdanost nosača kabine pri statičkom opterećenju.

Programski paket AFGROW, specijaliziran za simuliranje širokog spektra pukotina, korišten je za simuliranje pukotina sa stanovišta zamorne čvrstoće na ovjesištu nosača kabine.

Oba proračuna su pokazala da je kabina pouzdana za daljnju eksploataciju te da ne bi smjelo doći do propadanja konstrukcije uz redovne, godišnje, preglede.

Popis slika

- Slika 1.1. „Sljemenska žičara“
- Slika 2.1. 3D model nosača kabine
- Slika 2.2. Prikaz presjeka nosača kabine (profil)
- Slika 2.3. Definirani rubni uvjeti na ovjesištu okvira
- Slika 2.4. Kontinuirano opterećenje na dnu okvira
- Slika 2.5. Potpuno definiran numerički model nosača kabine
- Slika 2.6. Parabolični, kubni i tetraedarski elementi
- Slika 2.7. Naprezanja po Von Misesu, $\sigma_{\max} = 60 \text{ MPa}$
- Slika 2.8. Koncentracija naprezanja na spoju nosača i ovjesišta
- Slika 2.9. Naprezanje na unutarnjoj strani nosača
- Slika 2.10. Naprezanje u donjem unutarnjem dijelu nosača
- Slika 2.11. Pomaci nosača (Mjerilo pomaka 1:5), $\Delta l_{\max} = 2 \text{ mm}$
- Slika 3.1. Pojava ekstruzija i intruzija zbog pomaka u smjeru kliznih ravnina
- Slika 3.2. Pojava ekstruzija i intruzija zbog pomaka u smjeru kliznih ravnina (eksperiment)
- Slika 3.3. Faze rasta pukotine pri cikličnog opterećenju (crtež)
- Slika 3.4. Faze rasta pukotine pri cikličnog opterećenju
- Slika 3.5. Formiranje brazdi kod zamora
- Slika 3.6. Brazde (beach marks) stvorene kod zamornog loma
- Slika 3.7. Cikličko opterećenje
- Slika 3.8. Promjena naprezanja i koeficijenata intenzivnosti naprezanja oko vrška pukotine pri cikličkom opterećenju
- Slika 3.9. Određivanje brzine širenja pukotine u ovisnosti o ΔK
- Slika 3.10. Ovisnost brzine širenja pukotine o ΔK I faza: iniciranje pukotine, II faza područje eksponencijalnog rasta pukotine i III faza: nestabilni rast pukotine.
- Slika 3.11. Ovisnost brzine širenja pukotine o ΔK za neke čelike. Konstante eksponencijalnog zakona brzine rastapukotine $da/dN = C(\Delta K)^m$ za pojedine su čelike:
a) $C=6.89 \cdot 10^{-9}$, $m=3.0$, b) $C=1.36 \cdot 10^{-7}$, $m=2.25$, c) $C=5.61 \cdot 10^{-9}$, $m=3.25$.
Jedinice za ΔK su $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, a produljenje pukotine po ciklusu opterećenja izraženo je u mm
- Slika 3.12. Brzina širenja pukotine za neke materijale
- Slika 3.13. Utjecaji nekih karakteristika cikličkog opterećenja na brzinu širenja pukotine

- Slika 3.14. Rast pukotine i smanjivanje kritičnog naprezanja σ_c
- Slika 3.15. Rast pukotine uz periodične preglede i popravke nakon N_p ciklusa opterećenja
- Slika 3.16. Ovjesište nosača kabine sa simuliranom pukotinom
- Slika 3.17. Detalj spektra naprezanja kod simulacije pukotine
- Slika 3.18. Odabir materijala modela
- Slika 3.19. Odabir modela na kojem ćemo simulirati pukotinu
- Slika 3.20. Unos dimenzija modela i inicijalne pukotine
- Slika 3.21. Unos spektra opterećenja
- Slika 3.22. Određivanje stanja naprezanja
- Slika 3.23. Inicijalna pukotina, P1
- Slika 3.24. Ovisnost brzine širenja P1 o koeficijentu intenzivnosti naprezanja za zadani materijal
- Slika 3.25. Dijagram povećanja dimenzija P1 u ovisnosti o broju ciklusa
- Slika 3.26. Početak propagacije P1
- Slika 3.27. Kraj propagacije P1, lom ovjesišta
- Slika 3.28. Propagacija nakon godine dana u zadanom režimu vožnje, $a=4$ mm i $c=3$ mm
- Slika 3.29. Inicijalna pukotina, P2
- Slika 3.30. Ovisnost brzine širenja P2 o koeficijentu intenzivnosti naprezanja za zadani materijal
- Slika 3.31. Dijagram povećanja dimenzija P2 u ovisnosti o broju ciklusa
- Slika 3.32. Početak propagacije P2
- Slika 3.33. Kraj propagacije P2, lom ovjesišta
- Slika 3.34. Propagacija nakon godine dana u zadanom režimu vožnje, $a=4$ mm i $c=3$ mm
- Slika 3.35. Slika 3.35. Inicijalna pukotina, P3
- Slika 3.36. Ovisnost brzine širenja P3 o koeficijentu intenzivnosti naprezanja za zadani materijal
- Slika 3.37. Dijagram povećanja dimenzija P3 u ovisnosti o broju ciklusa
- Slika 3.38. Početak propagacije P3
- Slika 3.39. Kraj propagacije P3, lom ovjesišta
- Slika 3.40. Propagacija nakon godine dana u zadanom režimu vožnje, $a=4$ mm i $c=3$ mm
- Slika 3.41. Inicijalna pukotina, P4

Slika 3.42. Ovisnost brzine širenja P4 o koeficijentu intenzivnosti naprezanja za zadani materijal

Slika 3.43. Dijagram povećanja dimenzija P4 u ovisnosti o broju ciklusa

Slika 3.44. Početak propagacije P4

Slika 3.45. Kraj propagacije P4, lom ovjesišta

Slika 3.46. Propagacija nakon godine dana u zadanom režimu vožnje, $c=5$ mm

Popis oznaka

a	[mm]	- dubina pukotine u smjeru promjera
C	[-]	- konstanta rasta pukotine
$R_{p0,2}$	[N/mm ²], [MPa]	- konvencionalna granica tečenja
R	[-]	- omjer min i maks pukotinske žilavosti
E	[N/mm ²]	- modul elastičnosti
K_{th}	[MPa√m]	- prag pukotinske žilavosti
K_{crit}	[MPa√m]	- kritična pukotinska žilavost
K_{max}	[MPa√m]	- maksimalna sila
K_{eff}	[MPa√m]	- efektivna pukotinska žilavost
K_{IC}	[MPa√m]	- pukotinska žilavost
N	[-]	- broj ciklusa
σ_{max}	[N/mm ²], [MPa]	- maksimalno naprezanje
m	[-]	- eksponent u Walkerovoj jednadžbi
n	[-]	- eksponent u NASGRO jednadžbi
p	[-]	- eksponent u NASGRO jednadžbi
q	[-]	- eksponent u NASGRO jednadžbi
f	[-]	- funkcija otvaranja pukotine
G_V	[N]	- vlastita težina
G_K	[N]	- korisno opterećenje
Δl	[mm]	- pomak

Izjavljujem da sam rad radio samostalno koristeći se stečenim znanjem i navedenom literaturom.

Zahvaljujem mentoru Prof. dr. sc. Mirku Husnjaku, na uloženom trudu, podršci, usmjeravanju u radu te ugodnoj suradnji pri izradi diplomskog rada.

Također zahvaljujem asistentima Anti Bakiću, Nenadu Drvaru, te mojim kolegama Igoru Tomiću i Zvonimiru Tomičeviću.

Posebna bih se htio zahvaliti svojoj obitelji koja mi je bila velika podrška prilikom studija.

1. Uvod

„Sljemenska žičara“ postavljena je 1963. godine. Nakon četiri desetljeća upotrebe, opterećenja, raznih vremenskih prilika, došlo je vrijeme ispitivanja njene pouzdanosti. Na postojećem objektu ZET-ove žičare obavljena su mjerenja naprezanja u vitalnim dijelovima kabine pri statičkim uvjetima opterećenja te za vrijeme vožnje pod punim opterećenjem putnika i vjetra. Metodom konačnih elemenata provodimo proračun raspodjele naprezanja u nosivom elementu kabine, okviru koji obavlja samu kabinu, kod statičkog opterećenja.



Slika 1.1. „Sljemenska žičara“

Tom metodom dobivamo naprezanja i pomake približne stvarnim vrijednostima, koja uzimamo kao stvarna rješenja.

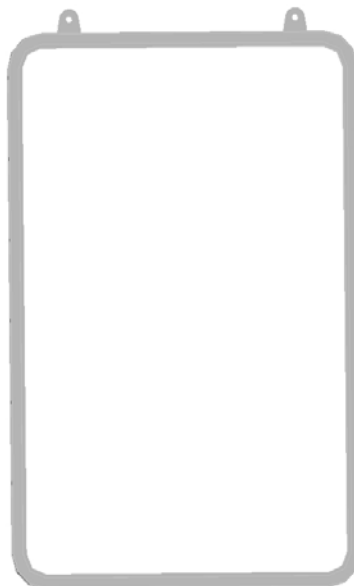
Sa stanovišta zamorne čvrstoće, simuliramo umjetno konstruirane inicijalne pukotine te ih podvrgavamo izmjerenim dinamičkim opterećenjem. Simulacija pokazuje sposobnost žičare, sa pukotinom na nosivom dijelu konstrukcije, da izdrži vremenski interval redovnog remonta.

2. Numerički proračun nosača kabine u statičkom režimu rada

2.1. Izrada 3D modela

Da bi omogućili numerički proračun nosača kabine, nacrtan je 3D model nosača (Slika 2.1.) po izmjerama sa postojećeg objekta, koristeći softverski paket SOLIDWORKS 2007 [1]. Pretpostavka kod modeliranja je da je stanje konstrukcije istovjetno stanju prilikom silaska kabine sa proizvodne linije.

◆ALGOR.



Slika 2.1. 3D model nosača kabine

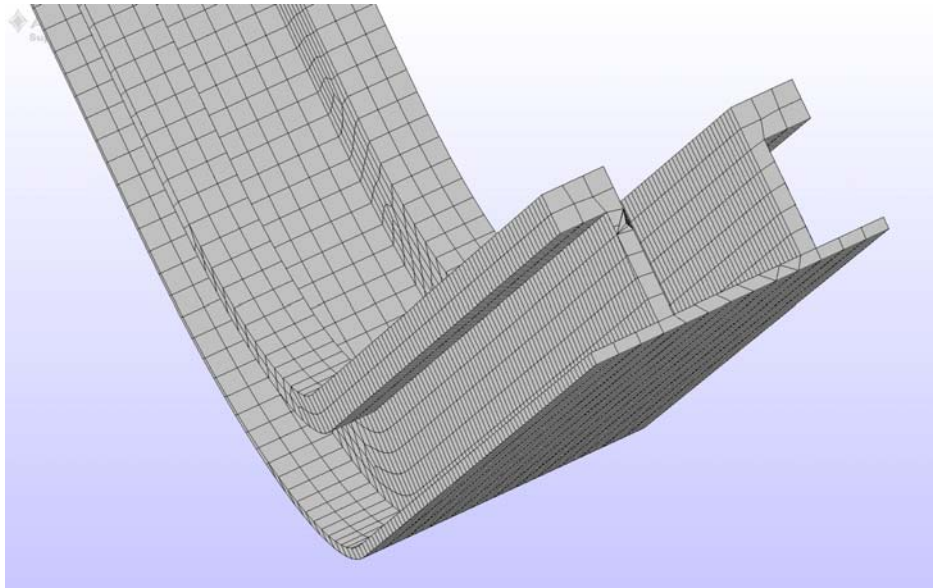
2.2. Metoda konačnih elemenata

Metoda konačnih elemenata je numerička metoda koja se temelji na fizičkoj diskretizaciji kontinuuma [2]. Razmatrani kontinuum s beskonačnim broj stupnjeva slobode zamjenjuje se s diskretnim modelom međusobno povezanih elemenata s ograničenim brojem stupnjeva slobode.

Područja kontinuuma dijeli se na konačna potpodručja koja se nazivaju konačni elementi, odnosno razmatrani kontinuum postaje mreža konačnih elemenata. Konačni su elementi međusobno povezani s u točkama koji se nazivaju čvorovi. Stanje u svakom elementu, kao što je npr. polje pomaka, deformacije, naprezanja te ostalih veličina u problemu polja, opisuje se pomoću interpolacijskih funkcija, a te funkcije moraju zadovoljiti odgovarajuće rubne uvjete, da bi diskretizirani model odgovarao stvarnom stanju. U pravilnu formulaciju konačnih elemenata, približavanje točnom rješenju raste s povećavanjem broja elemenata.

Prilikom izvođenja algebarskih jednadžbi polazi se od diferencijalnih jednadžbi koje opisuju stanje u elementu. Složene konstrukcije zahtijevaju diskretizaciju s velikim brojem elemenata s velikim brojem elemenata te valja riješiti sustav algebarskih jednadžbi s velikim brojem nepoznanica, što je bez korištenja računala vrlo teško postići.

Metoda konačnih elemenata primjenjuje se u mehanici deformabilnih tijela za rješavanje statičkih i dinamičkih problema, i jednako tako za rješavanje općih problema polja kao što su proračun temperaturnih polja, proračun strujanja te analiza elektromagnetnih polja.



Slika 2.2. Prikaz presjeka nosača kabine (profil)

2.3. Opterećenje nosača i rubni uvjeti

Za proračun metodom konačnih elemenata korišten je programski paket ALGOR [3].

Nosivost košare zasniva se na dva glavna okvira, gdje ćemo, zbog uzdužne simetričnosti te simetrične raspodjele opterećenja, promatrati samo jedan nosač (Slika 2.1. i Slika 2.2.).

Nosač je izrađen od legure aluminija, za koji podaci nisu dostupni. Za opterećenje konstrukcije u elastičnom području pretpostavljen je modul elastičnosti od $E=71000$ MPa.

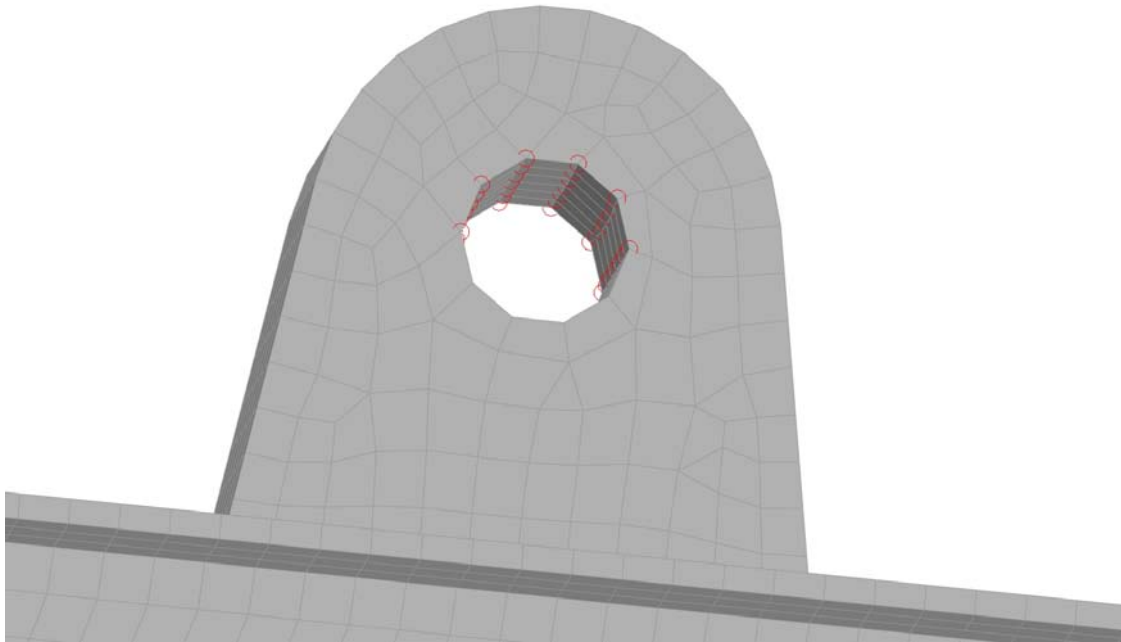
Za opterećenje je uzeto nominalno vertikalno opterećenje koje obuhvaća vlastitu težinu kabine (G_V) i korisno opterećenje (G_K).

Vlastita težina..... $G_V = 1200$ N

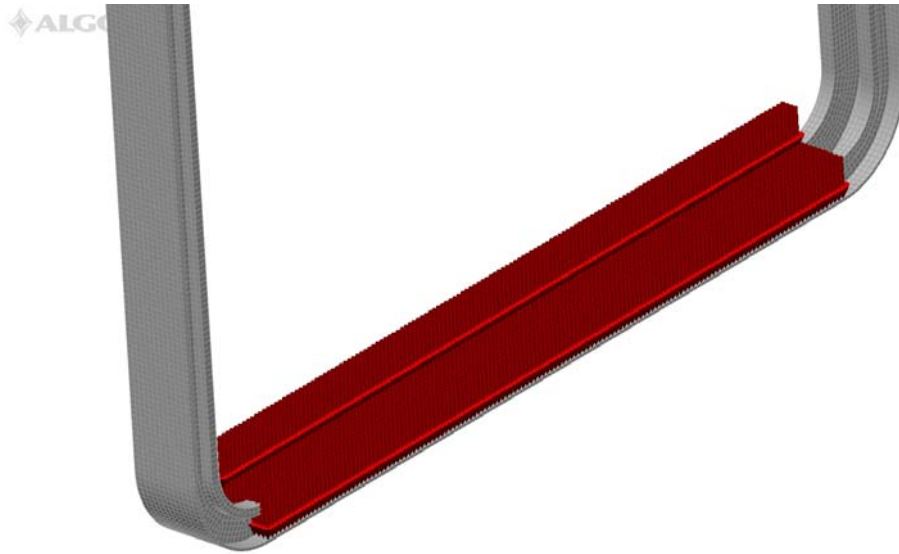
Korisno opterećenje..... $G_K = 3200$ N

Rubni uvjeti definirani su na način da su gornje plohe ovjesišta okvira fiksirane (omogućena je samo rotacija) (Slika 2.3.), dok su vlastita težina i korisno opterećenje postavljene na dno okvira kao kontinuirano opterećenje (Slika 2.4.).

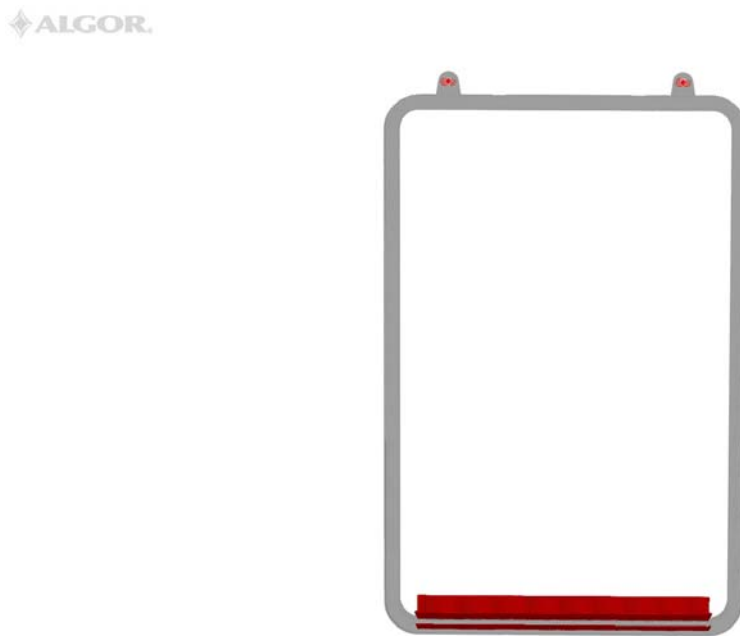
ALGOR.



Slika 2.3. Definirani rubni uvjeti na ovjesištu okvira

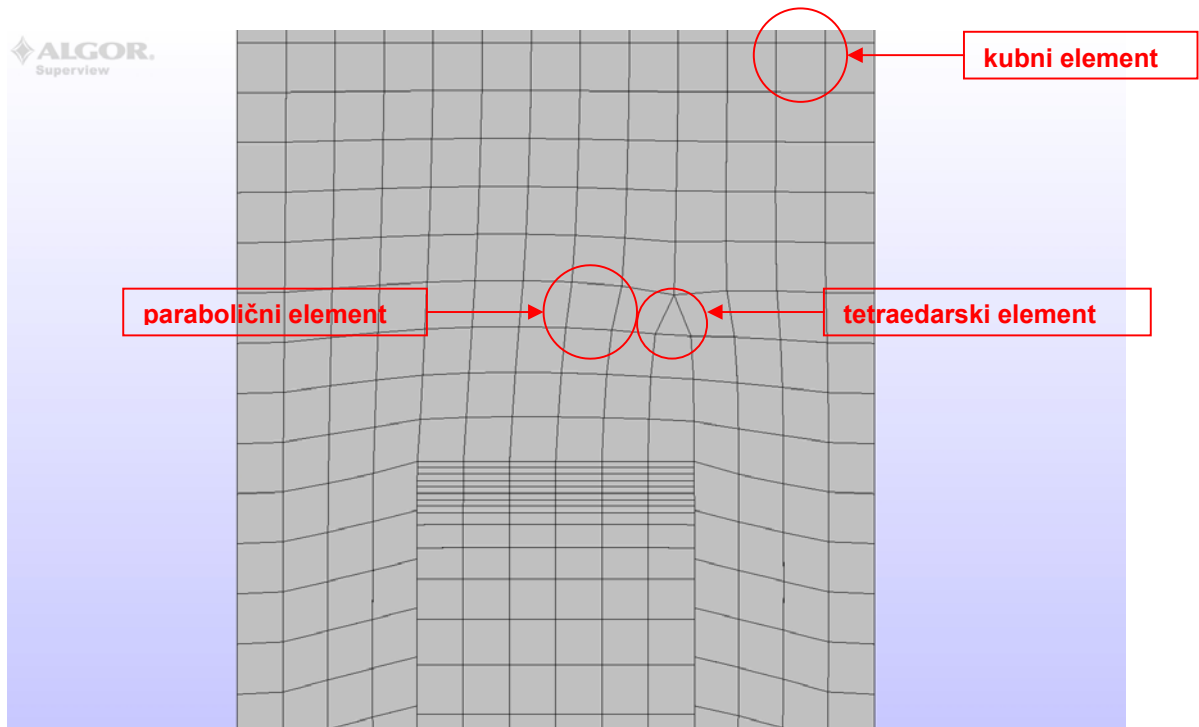


Slika 2.4. Kontinuirano opterećenje na dnu okvira



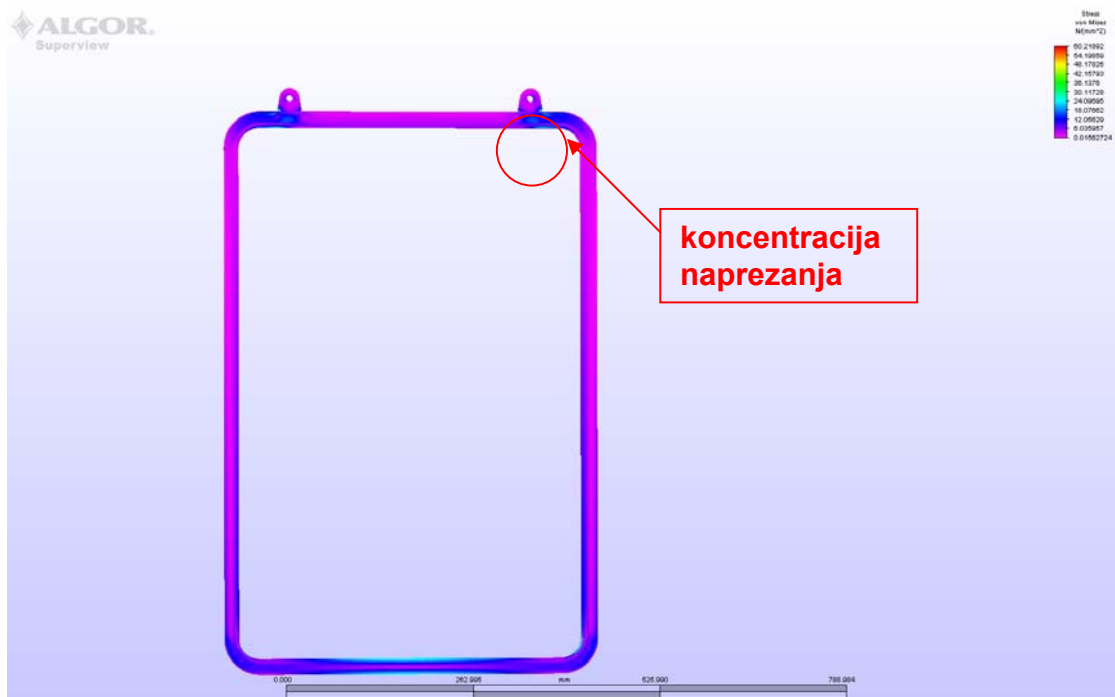
Slika 2.5. Potpuno definiran numerički model nosača kabine

Numerički proračun je izvršen pomoću metode konačnih elemenata pri čemu su korišteni parabolični, kubni i tetraedarski elementi veličine 8 mm (Slika 2.6.).



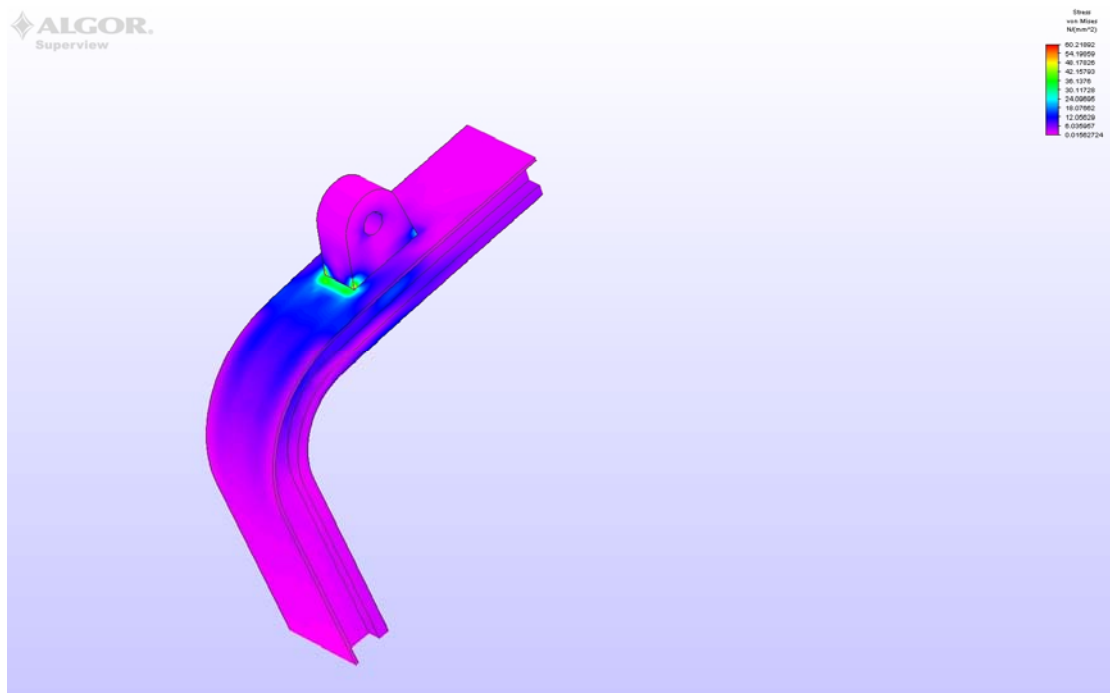
Slika 2.6. Parabolični, kubni i tetraedarski elementi

2.4. Naprezanja u nosaču kabine

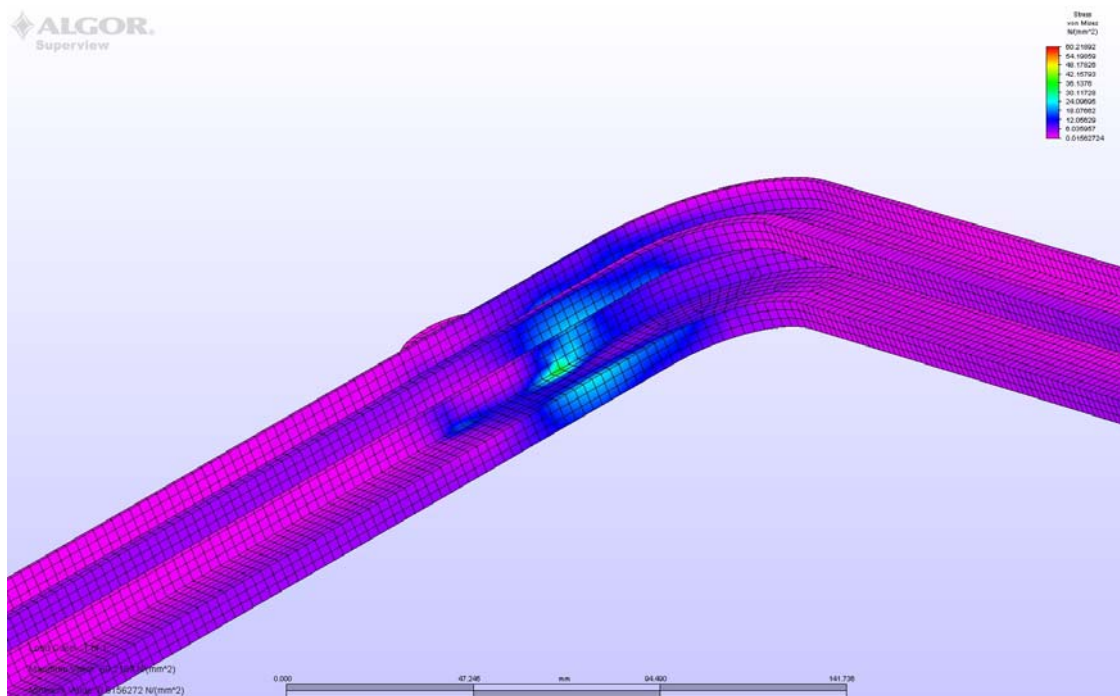


Slika 2.7. Raspodjela naprezanja po Von Misesu, $\sigma_{max} = 60 \text{ MPa}$

Na slici (Slika 2.7.) jasno se vidi raspodjela naprezanja kao i mjesta povišenih stanja naprezanja na nosaču kabine. Kritična mjesta se nalaze na spoju nosača i ovjesišta (Slika 2.8.), te na unutarnjoj strani okvira (Slika 2.8., Slika 2.9.).

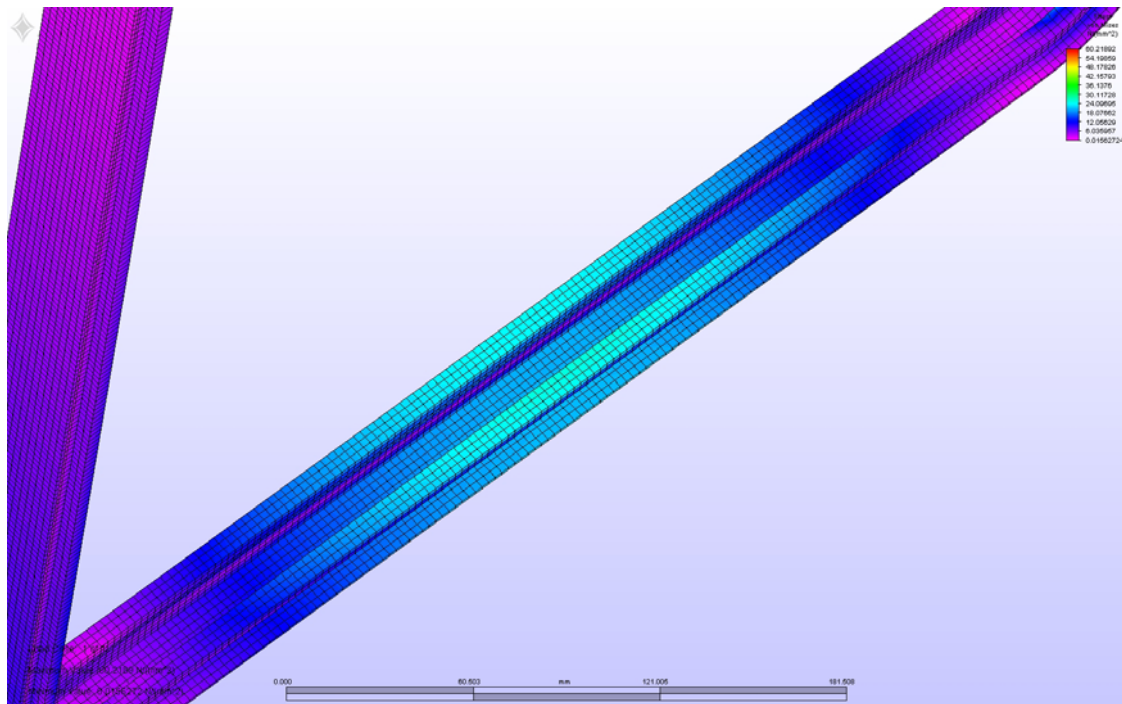


Slika 2.8. Koncentracija naprezanja na spoju nosača i ovjesišta



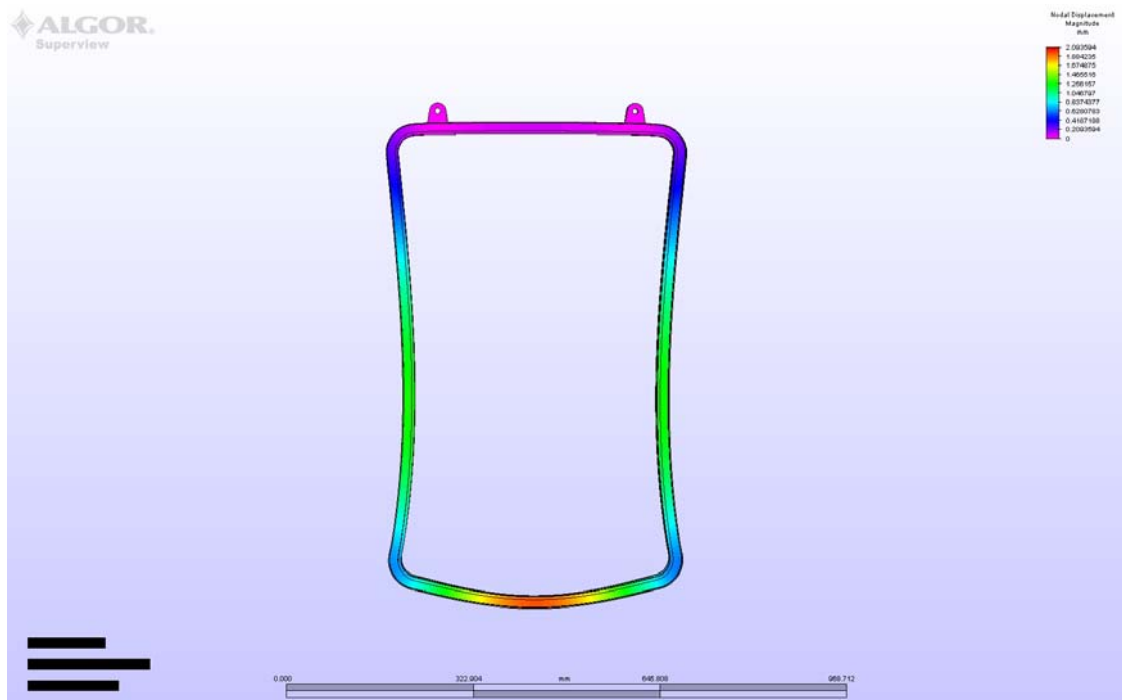
Slika 2.9. Naprezanje na unutarnoj strani nosača

Pošto na donju stranu okvira naliježe sama kabina (Slika 2.10.), te je učvršćena još nekim nosačima, dolazimo do zaključka da je područje dodatno ojačano te tako dodatno osigurano.



Slika 2.10. Naprezanje u donjem unutarnjem dijelu nosača

Na slici (Slika 2.11.) prikazan je deformirani oblik nosača sa vrijednostima pomaka pojedinih točaka. Maksimalni pomak iznosi 2 mm i nalazi se na donjem dijelu okvira te je isti u granicama elastičnog područja.



Slika 2.11. Pomaci nosača (Mjerilo pomaka 1:5), $\Delta l_{max} = 2 \text{ mm}$

3. Simulacija pukotine

3.1. Proces loma pri cikličkom opterećenju

Lom zbog cikličnog opterećenja (zamorni lom) kudikamo je najučestaliji oblik loma u praksi. Takvi lomovi nastaju kod veličina naprezanja koja su manja od vlačne čvrstoće čak i kod normalno duktilnih materijala niske čvrstoće [4].

Pojava je zamora uočena prije više od 100 godina i čitavo se vrijeme do danas proučava kako bi se pronašli uzroci i ublažile posljedice.

Proces zamora materijala pri cikličnom opterećenju može se podijeliti u tri faze:

1. iniciranje pukotine,
2. propagacija pukotine do kritične veličine,
3. nestabilni lom završnog dijela presjeka.

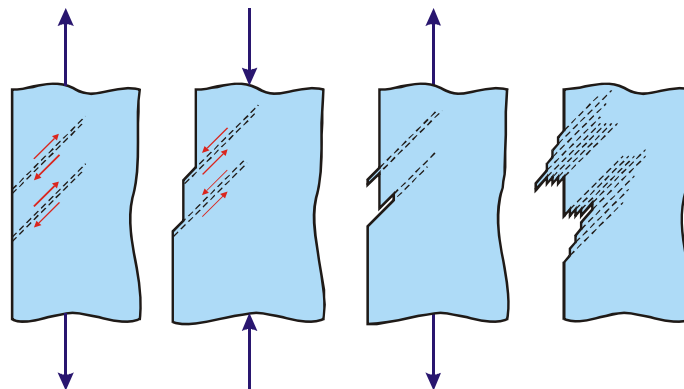
Zamor nastaje kao rezultat plastične deformacije i u razdoblju inicijacije, i u razdoblju propagacije pukotine. Sve do završnog loma zamorno širenje pukotine određeni je oblik duktilnog loma materijala, iako je ta duktilnost, potpuno lokalne prirode, ograničena samo na procesnu zonu.

Zamorni je efekt zapravo kumulativno djelovanje mikroskopski ograničenih zbivanja kojih može biti više milijuna u jednome procesu zamornog loma pa je teško unaprijed predvidjeti vijek trajanja elemenata koji je počeo pucati i koji je trajno izvrnut cikličnom opterećenju.

Iniciranje pukotine. Pukotine kod zamora mogu se izazvati na više načina, no važna je činjenica da one počinju formirati na slobodnoj površini. Zbog toga je vrlo važno stanje površine pri ispitivanju otpornosti na zamor. Tako npr. poliranje legiranog čelika visoke čvrstoće može udvostručiti zamornu čvrstoću u odnosu na neobrađenu površinu istog materijala. Općenito vrijedi pravilo: što je materijal čvršći veći je utjecaj stanja površine na zamor. Niska zamorna čvrstoća nepoliranog materijala u stanju kakav se isporučuje posljedica je površinskih slojeva oksida nastalih kovanjem ili valjanjem. Ti su slojevi često neduktilni, lako pucaju pa tako postaju izvorni elementi koncentracije naprezanja. Gubitak ugljika

u površinskome sloju, napose izražen kod otkivaka, drugi je česti uzrok smanjenja zamorne čvrstoće. Iako se taj gubitak može donekle izbjeći skidanjem razugljivenoga sloja (tokarenjem), treba imati na umu da već sam proces skidanja strugotine ima važan utjecaj na smanjenje zamorne čvrstoće. Ponovno pougljičenje, kao i površinsko valjanje i prskanje metalnim granulatnom, može povišiti otpornost materijala na ciklično opterećenje.

Inicijatori zamornog loma mogu se pojaviti i na drugim formacijama na površini materijala ili u njoj blizini. Početak pukotine može dolaziti od prsnute čestice (tvrde uključine ili izlučine) na površini ili pod površinom elementa. Isto tako izvor loma može biti i mekana intergranularna zona koja često označuje tzv. trostruku točku (tri smjera pucanja). Neki slučajevi inicijalizacije pukotine posebno su značajni za razumijevanje osnovnih pojava koje su specifične za ciklična opterećenja. Tako npr. pukotina može početi na kliznim pojasovima koji se oblikuju za vrijeme cikličnih opterećenja kao posljedica akumulacije dislokacija. S tih kliznih pojaseva protrudiraju ekstruzije ili čupavi djelići materijala, koji postaju koncentratori naprezanja i na taj način žarište loma.

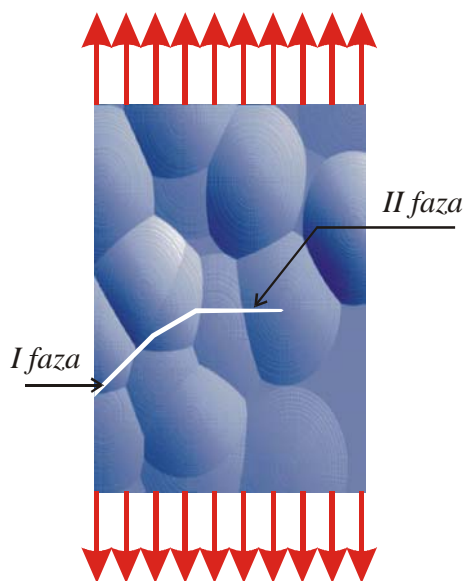


Slika 3.1. Pojava ekstruzija i intruzija zbog pomaka u smjeru kliznih ravnina



Slika 3.2. Pojava ekstruzija i intruzija zbog pomaka u smjeru kliznih ravnina (eksperiment)

Rast pukotine. Kad je jednom pukotina inicirana na površinskome kliznome pojasu u jednom jedinom kristalu, ona će se nastaviti širiti u smjeru primarnih ploha klizanja. To se očituje stvaranjem kliznih pojasova od kojih polazi pukotina prije nego što skrene u ravninu koja stoji makroskopski okomito na maksimalno vlačno naprezanje. Prije ove promjene smjera govorimo o prvoj fazi širenja pukotine, a, nakon skretanja, o drugoj fazi. U kojem će trenutku nastati promjena smjera, ovisi o intenzitetu vlačnog naprezanja. Kod manjih vlačnih naprezanja prva će faza zauzimati veće područje na plohi loma. Prva je faza često vrlo izražena kod torzijskih cikličnih opterećenja. Pri velikim vlačnim napreznjima može se dogoditi da se prva faza i ne može zamijetiti (npr. kod oštro urezanih uzoraka s velikim faktorom koncentracije naprezanja). U tom slučaju rast pukotine teče praktično na način tipičan za drugu fazu od samog početka.



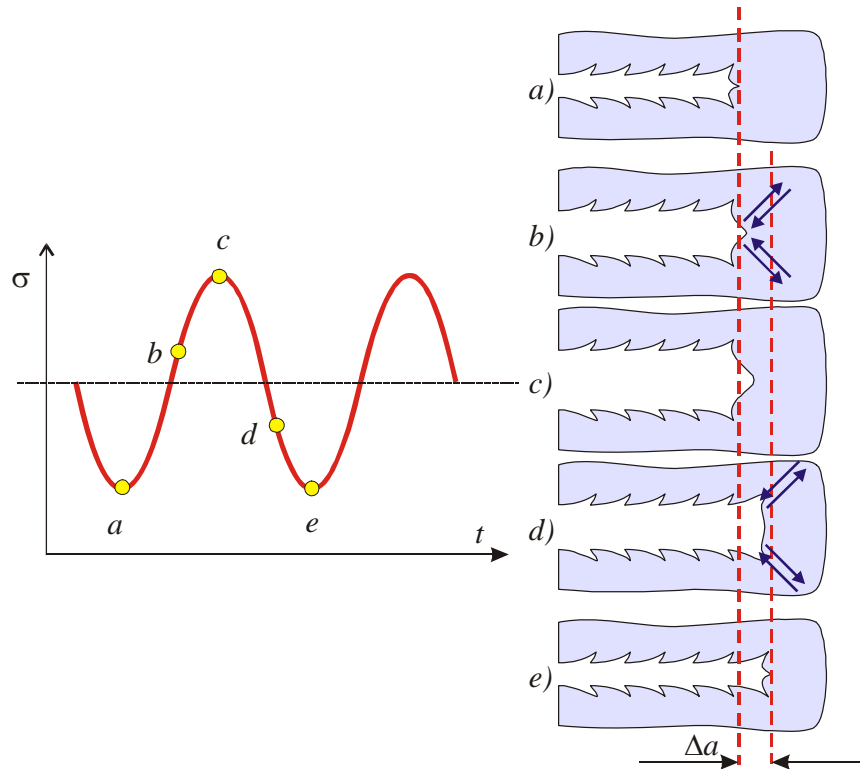
Slika 3.3. Faze rasta pukotine pri cikličnom opterećenju (crtež)



Slika 3.4. Faze rasta pukotine pri cikličnom opterećenju

Druga faza rasta može se istraživati pod uvjetima velike amplitude deformacije materijala jer se plastična deformacija koja nastaje na vršku pukotine može u tim uvjetima izravno promatrati. To je i razlog što se o drugoj fazi rasta zna više pa je mehanizam rasta u toj fazi zadovoljavajuće objašnjen. Jedna od najvažnijih značajki druge faze jest da pukotina napreduje konačnim priraštajima, od kojih svakom priraštaju odgovara jedan ciklus opterećenja. Druga važna značajka jest pojava markacija na površini loma, koje se nazivaju brazdama ili strijacijama. Svako brazdi odgovara jedan ciklus opterećenja, tako da nam brojenje brazdi

omogućuje brojenje mikronapredovanja fronte pukotine, a još je važnije i praćenje toka širenja pukotine (fosilizacija procesa loma).



Slika 3.5. Formiranje brazdi kod zamora



Slika 3.6. Brazde (beach marks) stvorene kod zamornog loma

Na početku ciklusa opterećenja vršak je pukotine oštar, ali za vrijeme povećanja opterećenja (razdoblje otvaranja pukotine) postaje tup i istodobno se plastična

zona pred vrškom širi. Koliko će to širenje biti, ovisi o intenzitetu naprezanja. Upravo za vrijeme maksimalnoga vlačnog naprezanja nastupa daljnji lom ligamenata procesom plastičnog loma ili odreza. Za vrijeme sljedeće faze, tj. faze smanjivanja opterećenja, ponovno se oblikuje oštri vršak pukotine. Pri tome se plastično rastegnuti materijal na vršku pukotine komprimira i oblikuje se brazda na površinama pukotine. Ispupčivanje je materijala pri vršku pukotine razumljivo, jer otvor je pukotine jedini slobodni put plastičnom tečenju materijala. Nakon toga proces se nastavlja.

Izmjenično otupljivanje i ponovno zaoštavanje vrška pukotine osnovna je značajka druge faze rasta. Kod intenzivnih naprezanja i niskofrekventnih cikličnih opterećenja brazde se vide golim okom, dok se prilikom naprezanja male amplitude ili kod visokofrekventnih opterećenja mogu vidjeti tek elektronskim mikroskopom. Ova pojava nije ograničena samo na kristalinična čvrsta tijela već je prisutna i kod nekristaliničnih polimera.

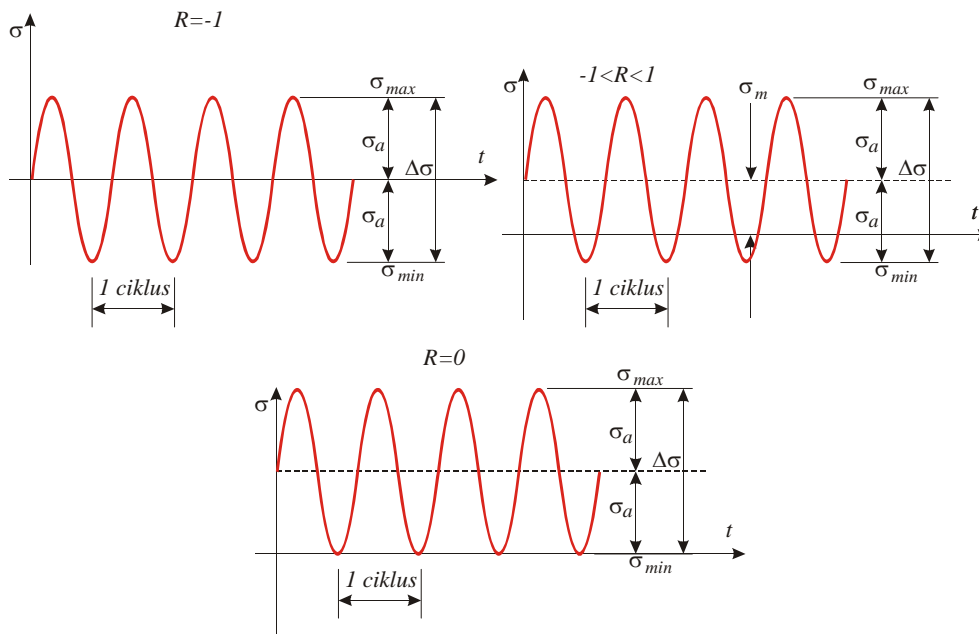
Nestabilni lom pukotine. U trećoj fazi rasta pukotine nastaje naglo nestabilno širenje pukotine. Kod materijala sklonih krhkom lomu ova će faza započeti u trenutku kada je postignuta kritična duljina pukotine, dok će kod duktilnih materijala početak treće faze ovisiti o naprezanju u oslabljenom dijelu presjeka (ligamentu).

Pri cikličkom opterećenju naprezanja se mijenjaju u ovisnosti o vremenu periodično. Pri tome je:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (3.1)$$

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (3.2)$$

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (3.3)$$



Slika 3.7. Cikličko opterećenje

Ako ciklički opterećeni element konstrukcije ima pukotinu, mijenjat će se ciklično i koeficijent intenzivnosti naprezanja pri vršku pukotine. Ta će promjena biti periodična ako se pukotina ne proširuje, budući da je veza između koeficijenata intenzivnosti naprezanja oko vrška pukotine i naprezanja određena jednadžbom:

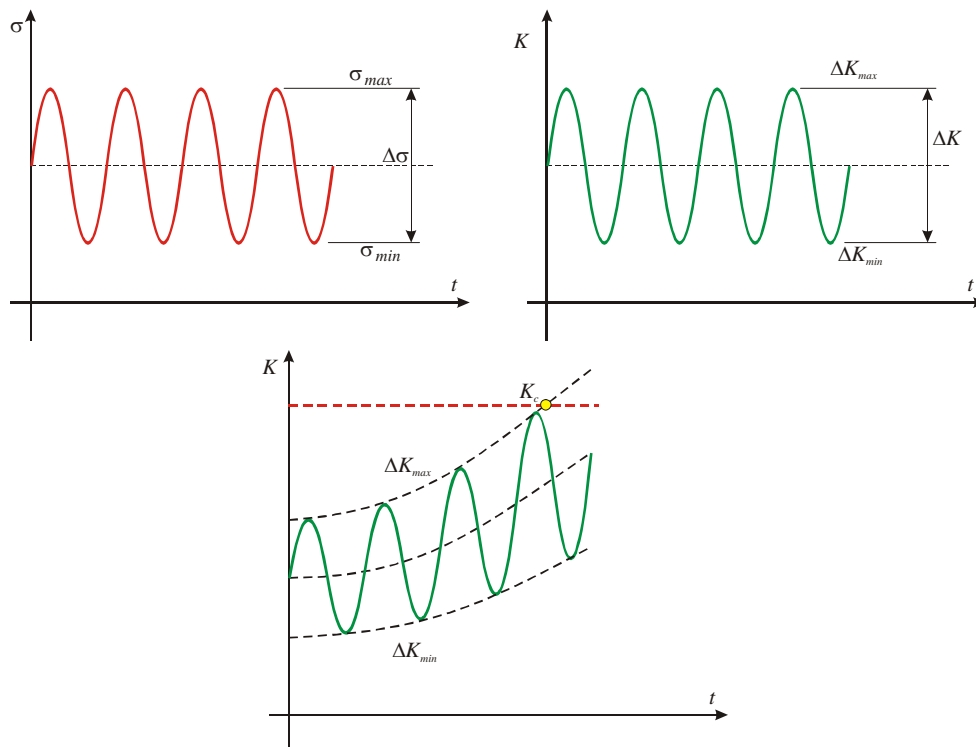
$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} Y(a) \quad (3.4)$$

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} \quad (3.5)$$

Pri rastu pukotine mijenjat će se koeficijent intenzivnosti naprezanja tako da se pri svakom proširenju pukotine poveća zbog povećanja duljine pukotine.

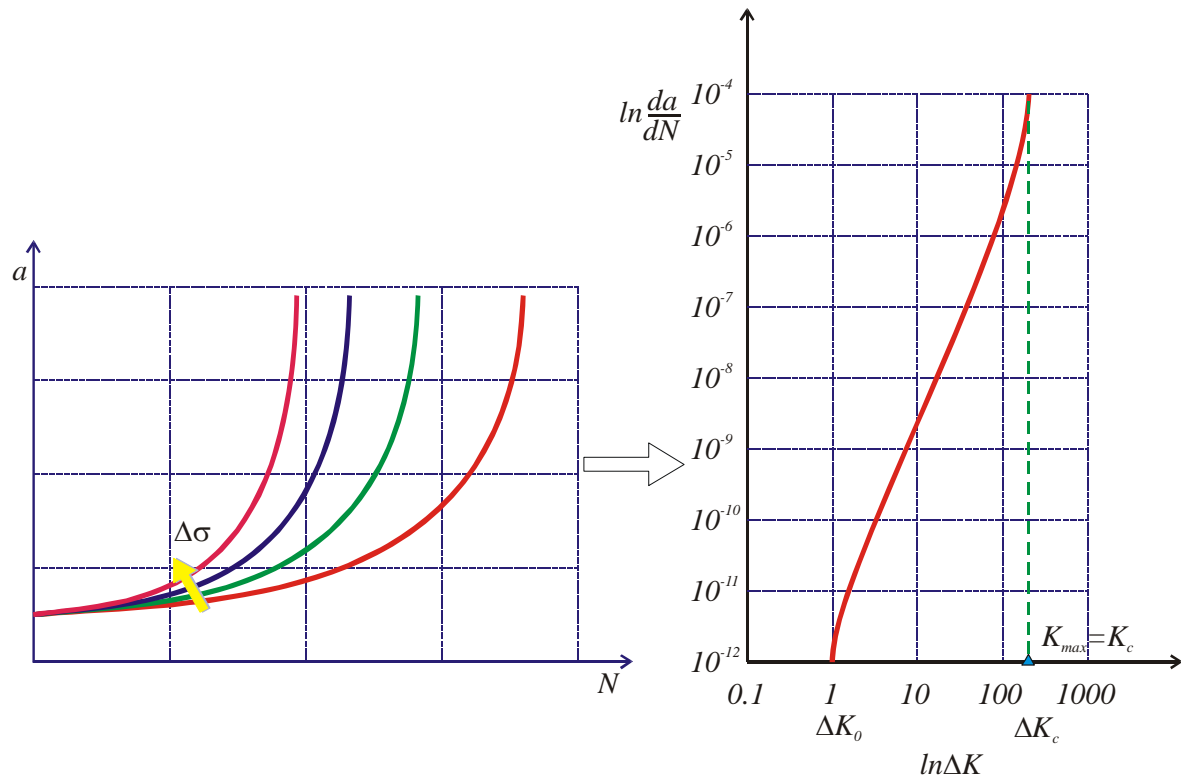
Lom ciklično opterećenog elementa konstrukcije nastat će u trenutku kad maksimalni koeficijenti intenzivnosti naprezanja postigne kritičnu vrijednost, tj.

$K_{\max} = K_c$ ili kad naprezanje u preostalom dijelu pukotinom oslabljena presjeka (ligamentu) postigne vlačnu čvrstoću materijala.



Slika 3.8. Promjena naprezanja i koeficijenta intenzivnosti naprezanja oko vrška pukotine pri cikličkom opterećenju

Da bi se odredila brzina širenja pukotine u ovisnosti o ΔK , može se provesti pokus kod kojeg se mjeri ovisnost duljine pukotine a o broju ciklusa opterećenja N (Slika 3.9).



Slika 3.9. Određivanje brzine širenja pukotine u ovisnosti o ΔK

Najmanja vrijednost ΔK ispod koje neće doći do širenja pukotine označena je s ΔK_0 , dok je ΔK_c ona vrijednost ΔK kod koje će doći do naglog, iznenadnog loma konstrukcije. Pri tome je $K_{\max} = K_c$.

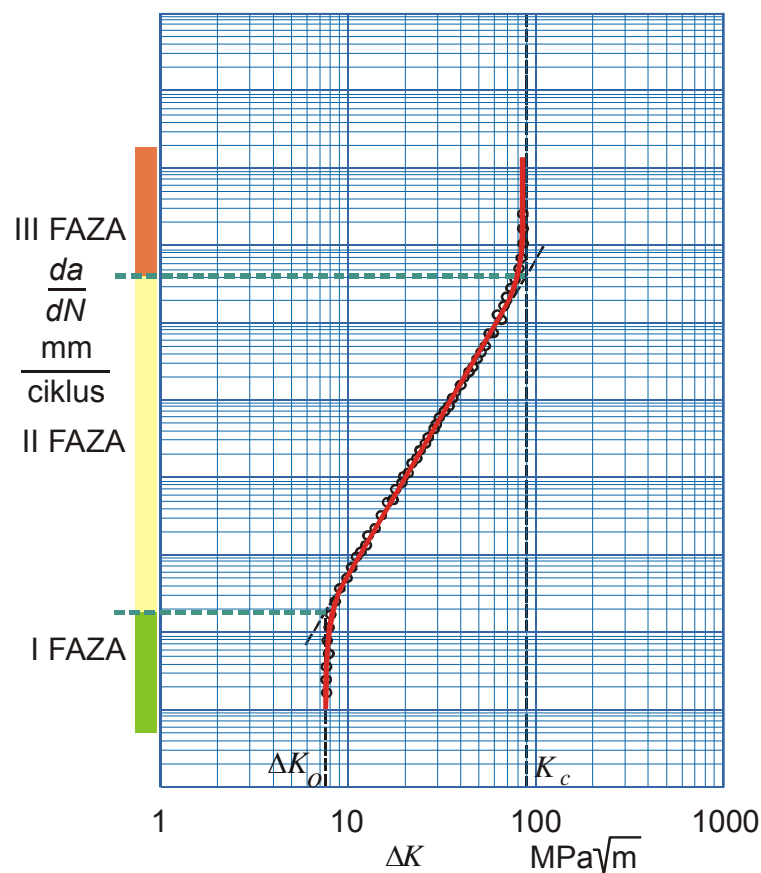
Određivanje granične vrijednosti kod koje će širenje pukotine biti uopće moguće može se provesti na nekoliko načina:

- postupnim smanjivanjem amplitude opterećenja sve dok ne dođe do zaustavljanja širenja pukotine
- zagrijavanjem uzorka s pukotinom sve dok se ne uspostavi stanje zaostalih naprezanja pri vršku pukotine te naknadnim opterećivanjem do početka širenja pukotine,
- primjenom uzorka takva oblika kod kojeg se koeficijent intenzivnosti naprezanja smanjuje s povećanjem duljine

pukotine i opterećivanjem cikličnim opterećenjem konstantne amplitude sve do zaustavljanja širenja pukotine.

Bilo koji od ovih načina jest dugotrajan i zato skup. Broj ciklusa opterećenja po ispitnom uzorku mora biti između $5 \cdot 10^6$ i 10^7 ciklusa, a pri tome se ne smije proširiti pukotina.

Za proračun trajne čvrstoće najzanimljiviji je srednji dio krivulje na dijagramu $\ln(da) = f(\ln \Delta K)$.



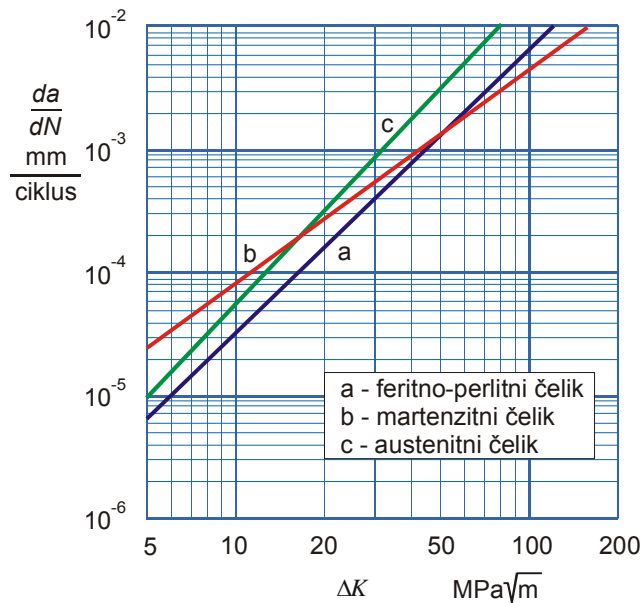
Slika 3.10. Ovisnost brzine širenja pukotine o ΔK I faza: iniciranje pukotine, II faza područje eksponencijalnog rasta pukotine i III faza: nestabilni rast pukotine

Najjednostavniji model koji približno opisuje tu funkciju postavio je Paul C. Paris tako da je pretpostavio da je taj dio krivulje u dvostruko logaritamskome mjerilu linearan:

$$\frac{da}{dN} = C_o (\Delta K)^m. \quad (3.6)$$

U ovom modelu C_o konstanta je materijala, a m eksponent između 2 i 4.

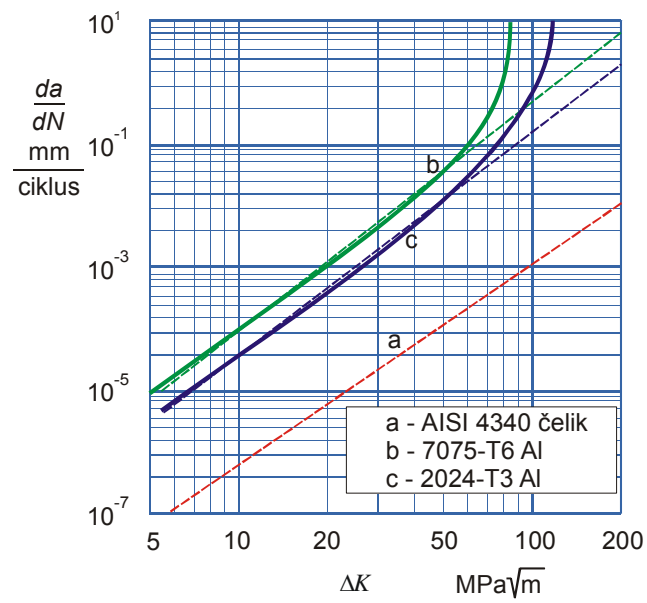
Primjeri dijagrama za neke materijale prikazani su na slikama.



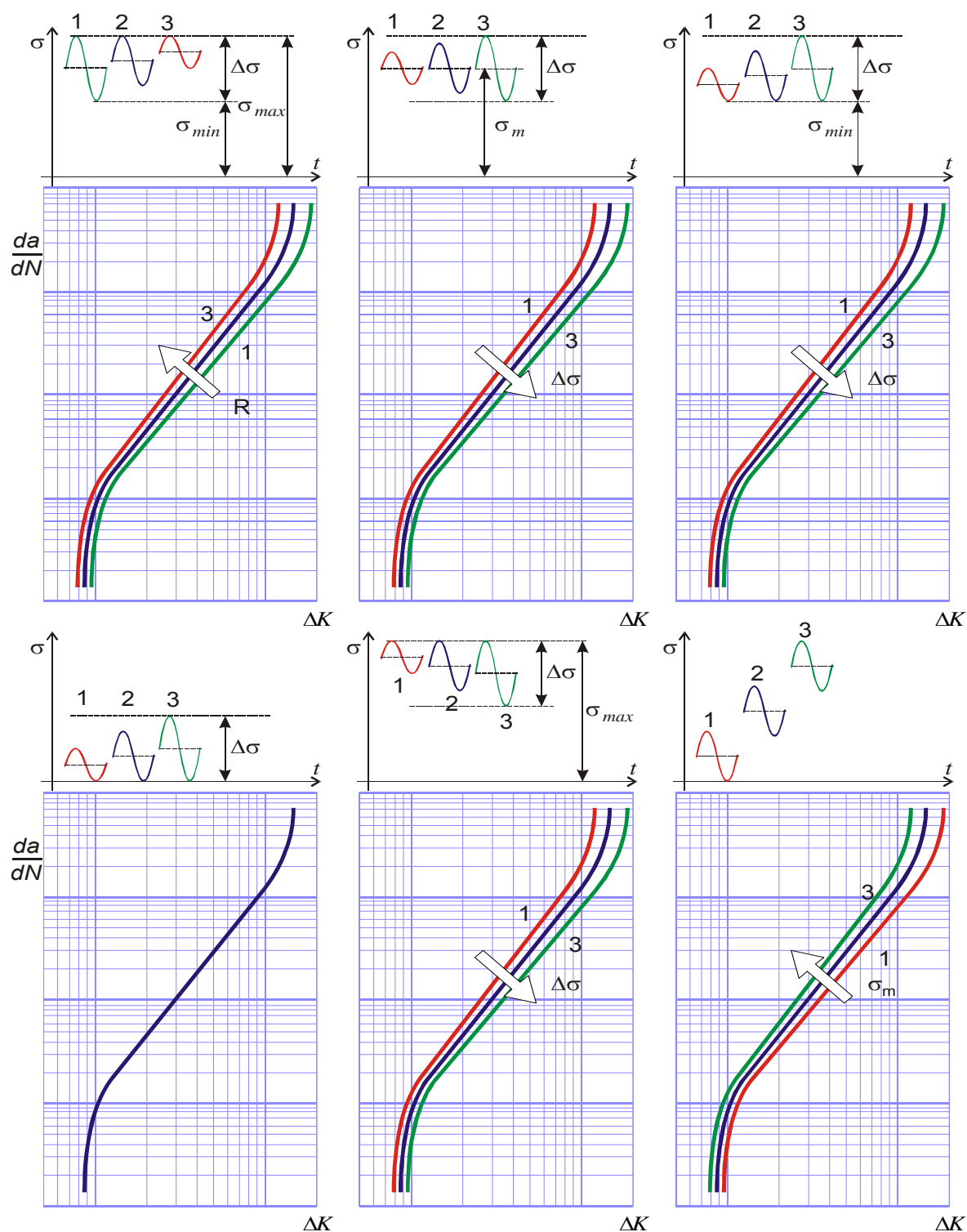
Slika 3.11. Ovisnost brzine širenja pukotine o ΔK za neke čelike. Konstante eksponencijalnog zakona brzine rastapukotine $da/dN = C(\Delta K)^m$ za pojedine su čelike:

- a) $C=6.89 \cdot 10^{-9}$, $m=3.0$, b) $C=1.36 \cdot 10^{-7}$, $m=2.25$, c) $C=5.61 \cdot 10^{-9}$, $m=3.25$.*

Jedinice za ΔK su $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, a produljenje pukotine po ciklusu opterećenja izraženo je u mm



Slika 3.12. Brzina širenja pukotine za neke materijale



Slika 3.13. Utjecaji nekih karakteristika cikličkog opterećenja na brzinu širenja pukotine

Svakako je ciklični koeficijent intenzivnosti naprežanja ΔK najvažniji faktor koji određuje brzinu širenja pukotine, ali nije i jedini. Drugi, također vrlo važan faktor koji utječe na brzinu širenja pukotine jest omjer najmanjeg i najvećeg naprežanja R , pa je, bar u linearnom dijelu dijagrama, potrebno uzeti u obzir i taj utjecaj. Utjecaj na ΔK_c može se opisati jednačinom:

$$\Delta K_c = (1 - R) K_c. \quad (3.7)$$

Ima nekoliko modela koji opisuju te utjecaje, a najčešće se spominje Formanov model, koji se osniva na sljedećoj jednačini:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^m}{(1 - R)K_c - \Delta K} = \frac{C(\Delta K)^m}{(1 - R)(K_c - K_{\max})} \quad (3.8)$$

Ta jednačina opisuje pojave u II. i III. fazi širenja pukotine. Za opisivanje u tijeku I. faze širenja pukotine može se uporabiti jednačina:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K - \Delta K_o)^m}{(1 - R)K_c - \Delta K}. \quad (3.9)$$

Kod negativnih veličina parametra R , tj. ako ciklus opterećenja zalazi i u tlačno područje, potrebno je u razmatranje uzeti samo onaj dio ciklusa opterećenja kod kojeg je $\sigma \geq 0$.

Određivanje broja ciklusa do loma. Iz poznate zakonitosti za brzinu širenja pukotine može se jednostavno izračunati broj ciklusa do loma, dakle "život" ciklično opterećene konstrukcije. Iz Parisova modela bit će:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m, \quad (3.10)$$

pa je prema tome:

$$dN = \frac{da}{C(\Delta K)^m}. \quad (3.11)$$

Provede li se integriranje broja ciklusa, može se odrediti broj ciklusa opterećenja koje će uzrokovati rast pukotine na veličinu a :

$$\int_{N_o}^N dN = \int_{a_o}^a \frac{da}{C(\Delta K)^m}. \quad (3.12)$$

Ovdje je N_o broj ciklusa opterećenja koji se mogu ostvariti do stvaranja pukotine duljine a_o .

Lom konstrukcije nastat će kad je:

$$K_{\max} = K_c \quad (3.13)$$

pa iz tog uvjeta možemo odrediti veličinu pukotine a_c u trenutku loma.

Budući da je:

$$K = \sigma\sqrt{\pi a}Y(a) \Rightarrow \Delta K = \Delta\sigma\sqrt{\pi a}Y(a) \quad (3.14)$$

pri čemu je $Y(a)$ funkcija koja ovisi o geometriji pukotine.

Tijekom širenja pukotine mijenja se njezina geometrija pa je potrebno poznavati funkciju $Y(a)$ unaprijed. U praksi se često primjenjuje aproksimacija kod koje se umjesto funkcije $Y(a)$ uzima njezina početna vrijednost $Y(a_o)$ te je:

$$\Delta K = \Delta K_o \left(\frac{a}{a_o} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.15)$$

Broj ciklusa do loma bit će:

$$N - N_o = \int_{a_o}^a \frac{da}{C(\Delta K)^m} = \int_{a_o}^a \frac{a_o^{\frac{m}{2}}}{C(\Delta K_o)^m} a^{-\frac{m}{2}} da. \quad (3.16)$$

Za $m = 2$ je nakon integriranja:

$$\Delta N = \frac{2a_o}{C(m-2)(\Delta K_o)^m} \left[1 - \left(\frac{a_o}{a} \right)^{\frac{m-2}{2}} \right], \quad (3.17)$$

dok je za $m = 2$:

$$\Delta N = \frac{a_o}{C(\Delta K_o)^2} \ln \frac{a}{a_o}, \quad (3.18)$$

gdje je ΔN broj ciklusa opterećenja kod porasta duljine pukotine od a_o do a .

Lom nastaje kada je $K_{\max} = K_C$, tj.:

$$K_c = \sigma \sqrt{\pi a_c} \quad \text{ili} \quad a_c = \frac{K_c^2}{\pi \sigma_{\max}^2}. \quad (3.19)$$

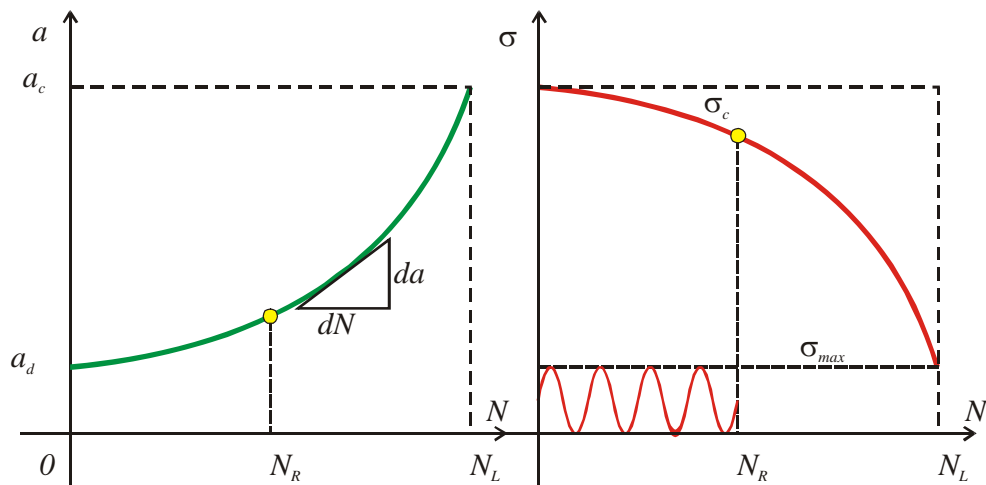
Poznavanje rasta pukotine posebno je značajno pri planiranju kontrolnih pregleda i remonta konstrukcija. Ako se pri ispitivanju nerazarajućim metodama ispitivanja otkriju i uklone sve pukotine veće od a_d tj. one pukotine koje su veće od praga osjetljivosti primijenjene nerazarajuće metode ispitivanja, tada će u tijeku cikličnog opterećenja konstrukcije doći do rasta ove pukotine. Proračun vijeka trajanja konstrukcije mora biti proveden tako da predviđeni broj radnih ciklusa opterećenja N_R s faktorom sigurnosti:

$$FS_N = \frac{N_L}{N_R} \quad (3.20)$$

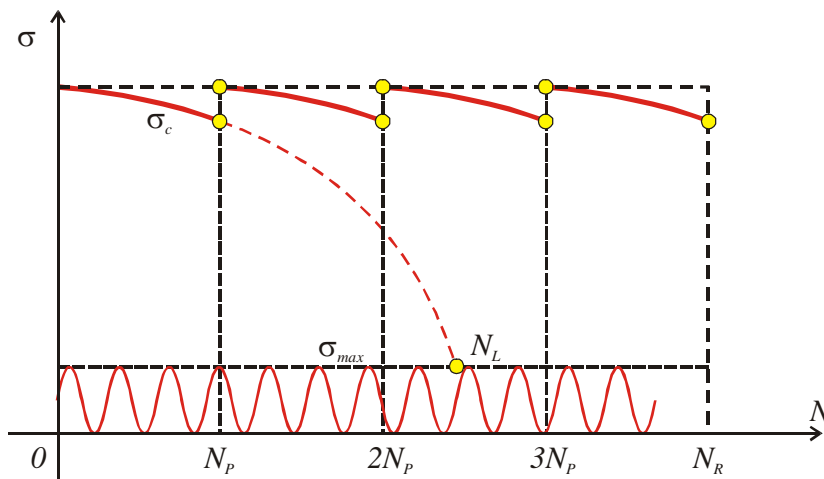
gdje je N_L broj ciklusa kod kojeg će nastati lom. Pri tome također mora biti zadovoljen i faktor sigurnosti za naprezanja:

$$FS_\sigma = \frac{\sigma_c}{\sigma_{\max}}. \quad (3.21)$$

Rastom pukotine smanjuje se σ_c i u trenutku loma bit će $N = N_L$ i $\sigma_c = \sigma_{\max}$ (Slika 3.14).



Slika 3.14. Rast pukotine i smanjivanje kritičnog naprezanja σ_c

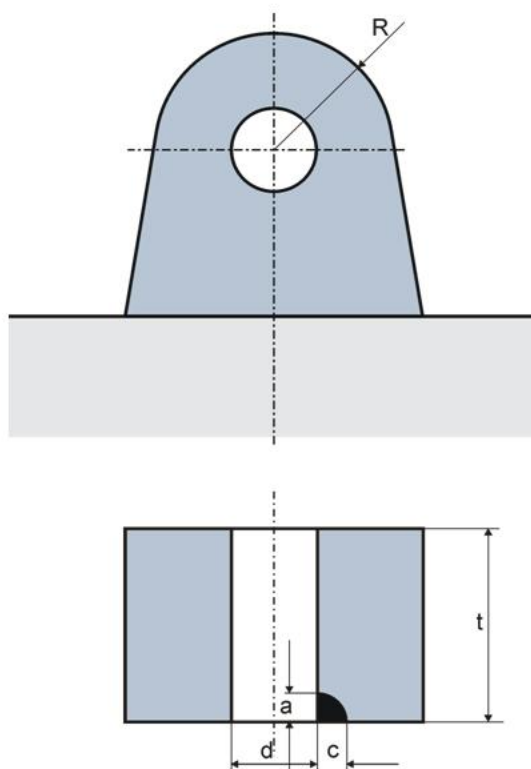


Slika 3.15. Rast pukotine uz periodične preglede i popravke nakon N_p ciklusa opterećenja

Ako se, međutim, nakon N_p ciklusa opterećenja provede pregled konstrukcije i popravak ili pak zamjena svih dijelova koji imaju pukotinu (veću od praga osjetljivosti metode nerazarajućeg ispitivanja a_d), dijagram smanjenja kritičnog naprezanja σ_c bit će sličan dijagramu na slici (Slika 3.155).

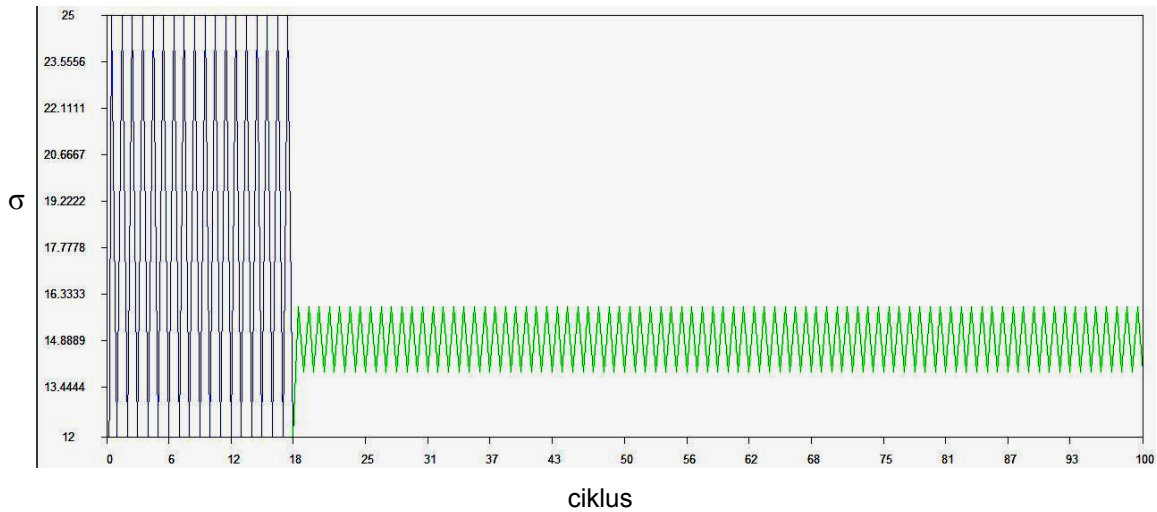
3.2. Definiranje modela za simulaciju pukotine

Za provođenje zamorne čvrstoće pojedinih elemenata konstrukcije simulirana je pukotina na najopterećenijem dijelu konstrukcije – ovjesištu upotrebom programskog paketa AFGROW 4.11.14.0 (www.siresearch.info) [5].



Slika 3.16. Ovjesište nosača kabine sa simuliranom pukotinom

Promjenjivo opterećenje kojem je podvrgnut zadani model, dobiveno je mjerenjima na pravom modelu [4]. Spektar opterećenja sastavljen je tako da se obuhvati vožnja između stupova i prijelaz preko stupova kada naprezanja postaju znatno veća. Treba napomenuti da je kod pokusne vožnje kabina bila opterećena većim teretom od nominalnog (10%) te da je vožnja bila provedena kod maksimalne dopuštene brzine vjetrova [6].



Slika 3.17. Detalj spektra naprezanja kod simulacije pukotine

Za simulaciju propagacije pukotine kod ciklički promjenjivog opterećenja korištena je modifikacija Formanove jednadžbe:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C \Delta K^m}{(1-R) K_C - \Delta K} \quad (3.1)$$

tako da je brzina širenja pukotine zadana jednadžbom:

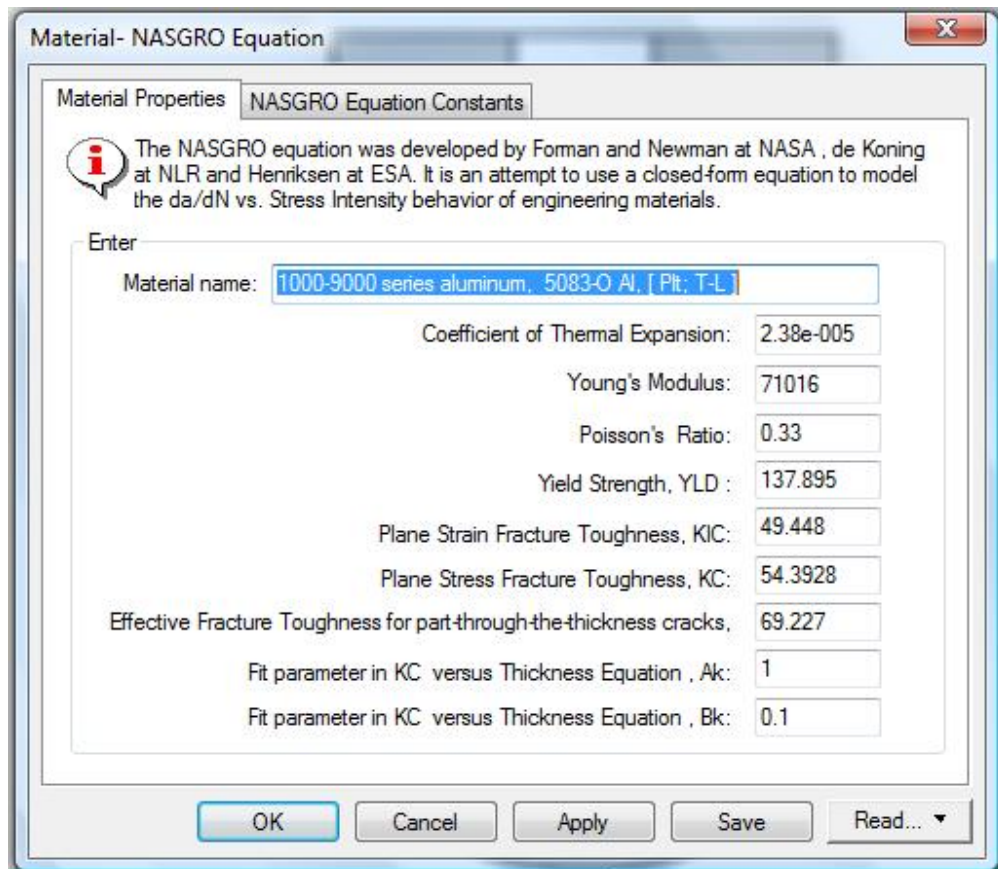
$$\frac{da}{dN} = C \left[\left(\frac{1-f}{1-R} \right) \Delta K \right]^n \frac{\left(1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K} \right)^p}{\left(1 - \frac{\Delta K_{max}}{\Delta K_{crit}} \right)^q} \quad (3.2)$$

Pretpostavljeni materijal (Aluminij) korišten za izradu nosača kabine žičare ima slijedeća svojstva: $E=71000$ MPa , $\nu=0,33$, $R_{p02}=138$ MPa , $K_{IC}=54,4$ MPa \sqrt{m} , $K_{eff}=69,2$ MPa \sqrt{m} .

Dimenzije početne pukotine odabrane su tako da se vizualno mogu jednostavno otkriti za vrijeme godišnjeg remonta.

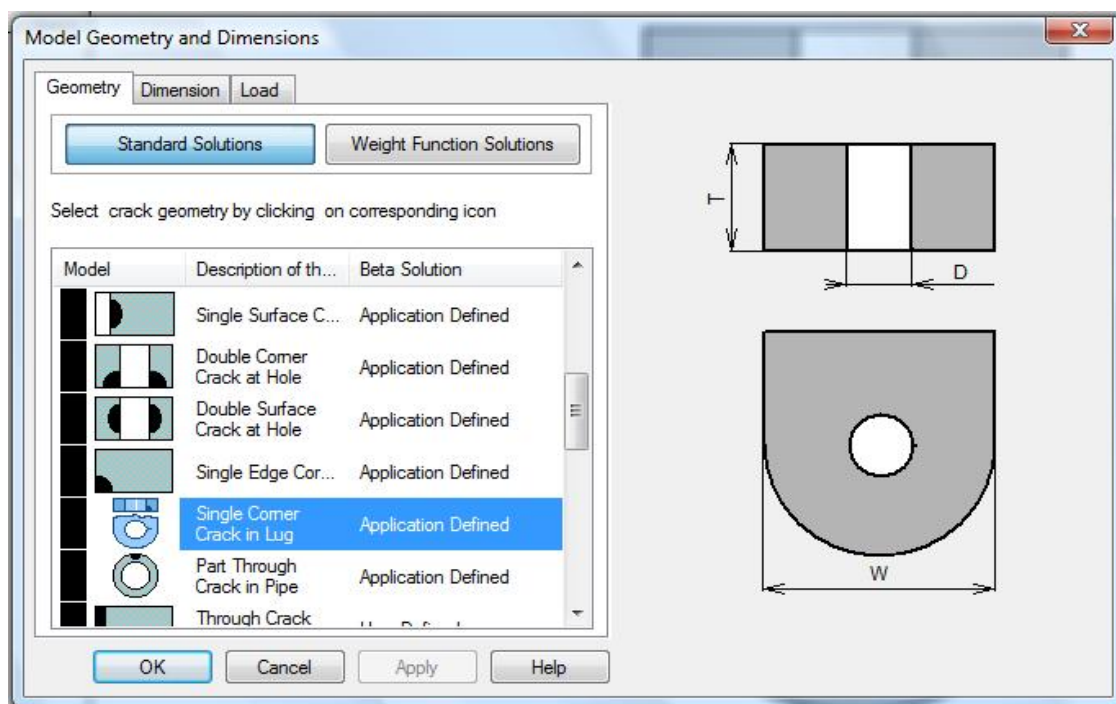
3.3. Definiranje varijabli u programskom paketu AFGROW

Počinjemo sa unosom vrste materijala modela kojeg ćemo simulirati (Slika 3.18.)

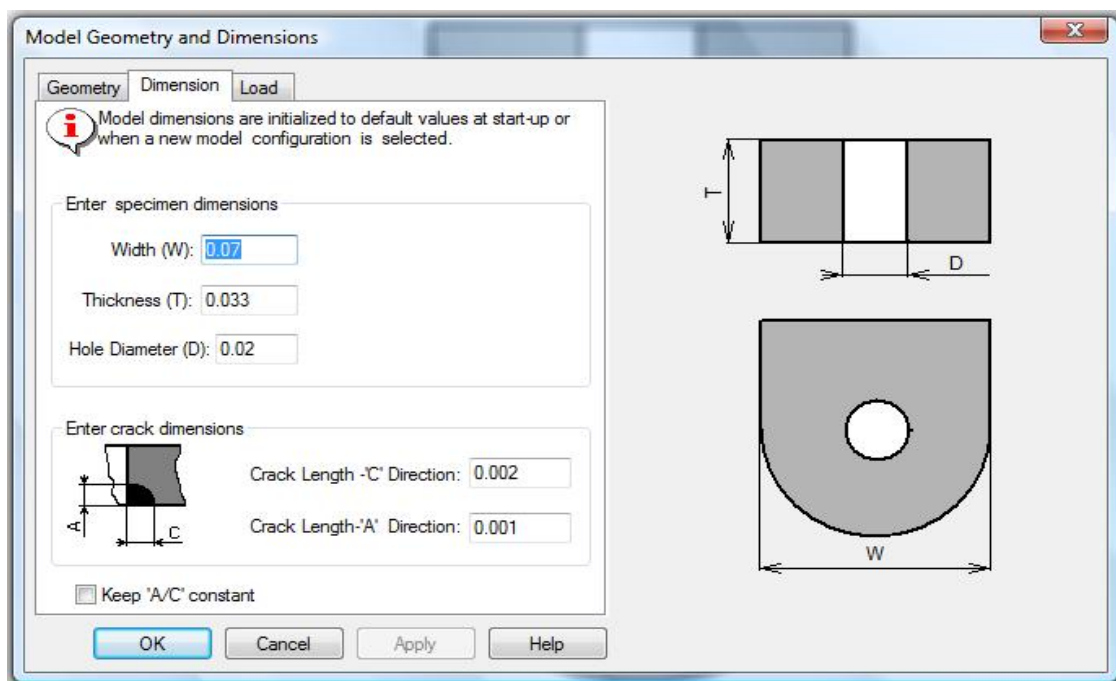


Slika 3.18. Odabir materijala modela

Zatim odabiremo model i zadajemo dimenzije samog modela i inicijalne pukotine (Slika 3.19. i 3.20.).

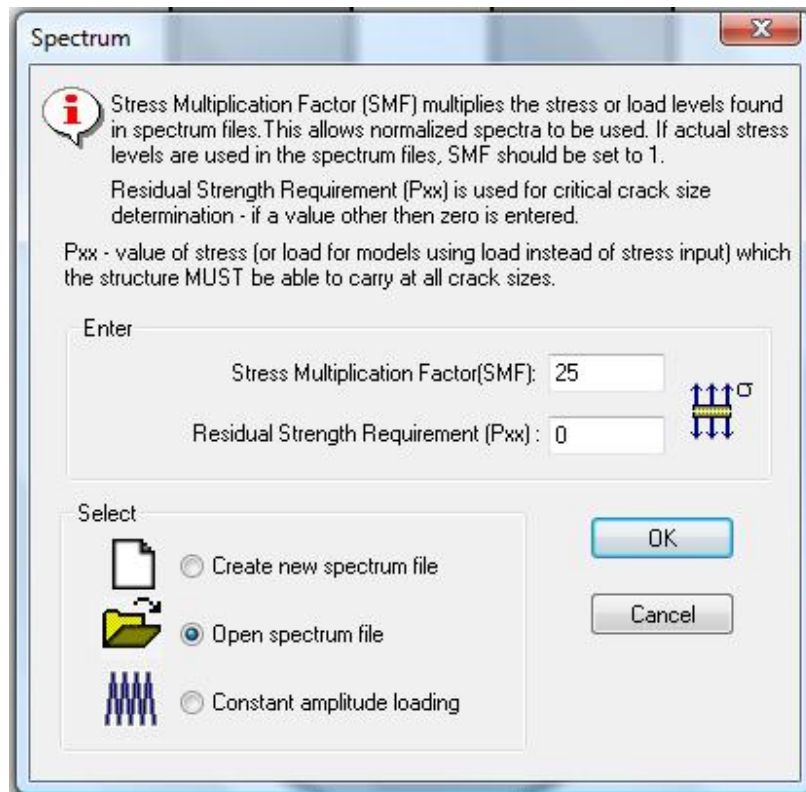


Slika 3.19. Odabir modela na kojem ćemo simulirati pukotinu



Slika 3.20. Unos dimenzija modela i inicijalne pukotine

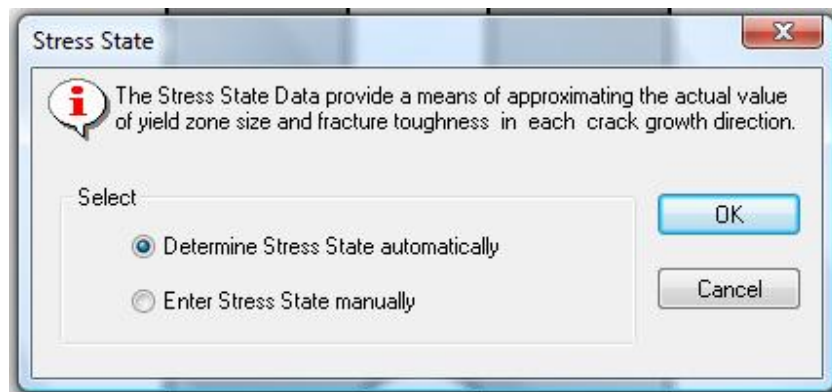
Nakon odabira materijala i dimenzioniranja odgovarajućeg modela unosimo spektar cikličkog opterećenja (Slika 3.21.).



Slika 3.21. Unos spektra opterećenja

Spektar opterećenja zadan je jedinično te se množi sa multiplikacijskim faktorom opterećenja, koji je jednak maksimalnom naprezanju.

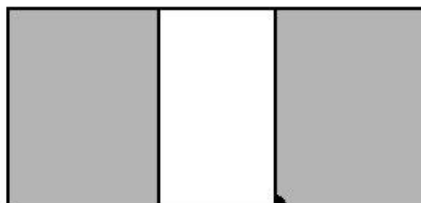
Na kraju određujemo stanje naprezanja, koje pri jednostavnim cikličkim opterećenjima izvršava sam programski paket (Slika 3.22.).



Slika 3.22. Određivanje stanja naprezanja

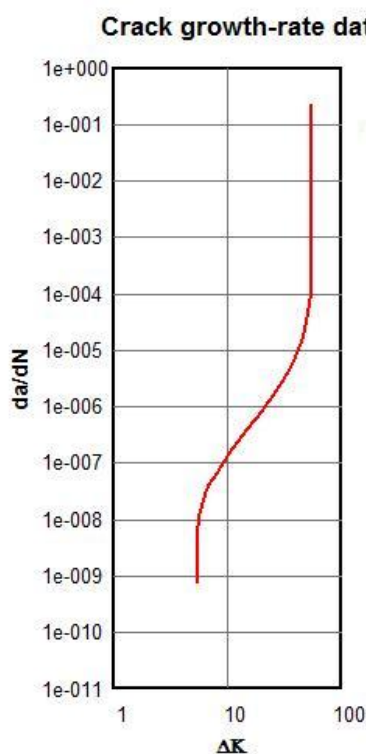
3.3.1. Inicijalna pukotina kvadratnog poprečnog presjeka

Odabrana je pukotina dimenzija $a=2$ mm i $c=2$ mm, na unutarnjem rubu ovjesišta, u daljnjem tekstu P1 (Slika 3.23.).



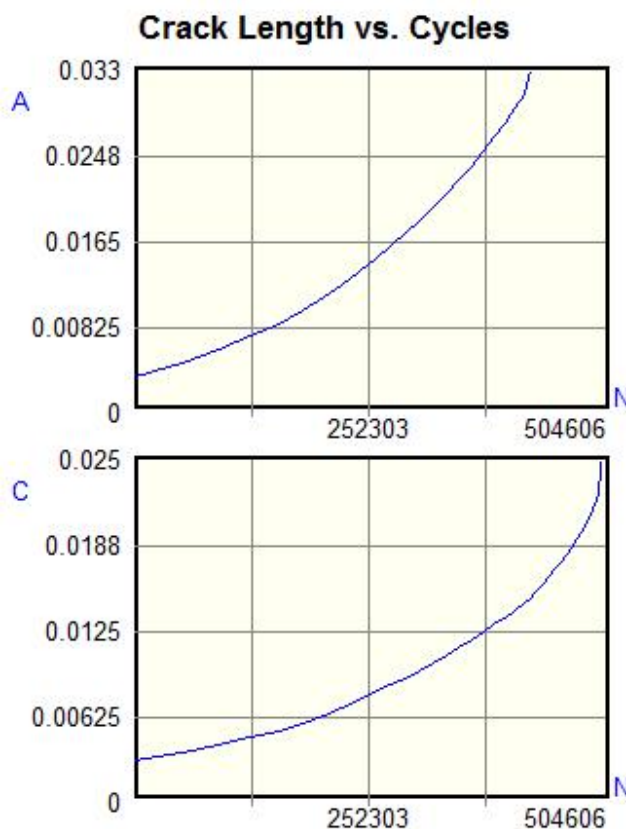
Slika 3.23. Inicijalna pukotina, P1

Grafički prikaz brzine širenja pukotine u ovisnosti o koeficijentu intenzivnosti naprezanja vidi se na slici (Slika 3.24.).



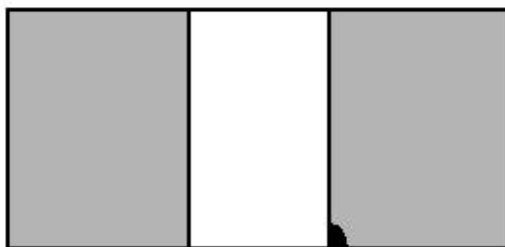
Slika 3.24. Ovisnost brzine širenja P1 o koeficijentu intenzivnosti naprezanja za zadani materijal

Simulirano propagiranje pukotine, mijenjanje njenih dimenzija, odvija se prema dijagramima A/N (Slika 3.25.).



Slika 3.25. Dijagram povećanja dimenzija P1 u ovisnosti o broju ciklusa

Prikaz početka propagacije pukotine vidi se na slici (Slika 3.26.).



Slika 3.26. Početak propagacije P1

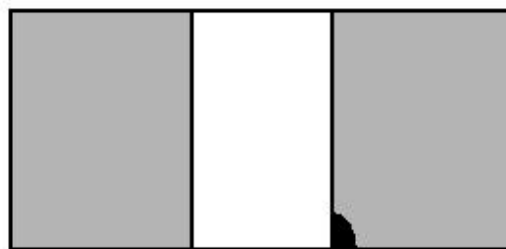
Sami početak propagacije pukotine odlikuje širenje duž provrta ovjesišta te takva propagacija traje do desetine ukupnog broja ciklusa. Nakon toga dolazi do širenja pukotine i u poprečnom smjeru, a na kraju do samog pucanja ovjesišta (Slika 3.27.).



Slika 3.27. Kraj propagacije P1, lom ovjesišta

Rezultati simulacije pokazuju da će do loma na mjestu simulirane pukotine doći nakon 5046. vožnje kabine pod punim opterećenjem.

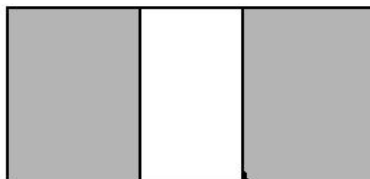
Ukoliko kabina vozi 180 dana u godini, a dnevno izvede 5 vožnji, može voziti slijedećih 5.6 godina. U roku od godine dana, što je ujedno i remontni interval, početna pukotina od 2 x 2 mm će propagirati na otprilike 4 x 3 mm (Slika 3.28.), a to je duljina koja će jasno biti vidljiva za vrijeme samog remonta.



Slika 3.28. Propagacija nakon godine dana u zadanom režimu vožnje, $a=4\text{ mm}$ i $c=3\text{ mm}$

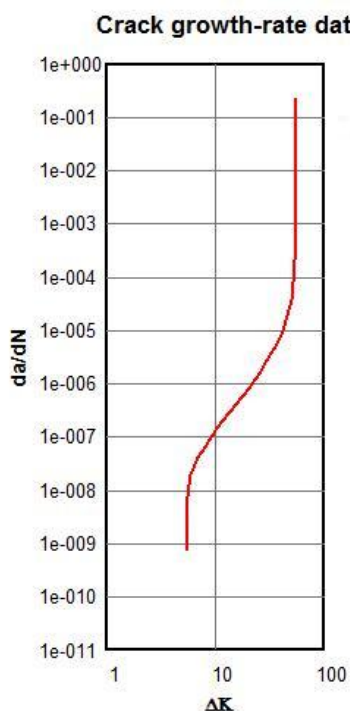
3.3.2. Inicijalna pukotina pravokutnog poprečnog presjeka u aksijalnom smjeru

Odabrana je pukotina dimenzija $a=2$ mm i $c=1$ mm, na unutarnjem rubu ovjesišta, u daljnjem tekstu P2 (Slika 3.29.).



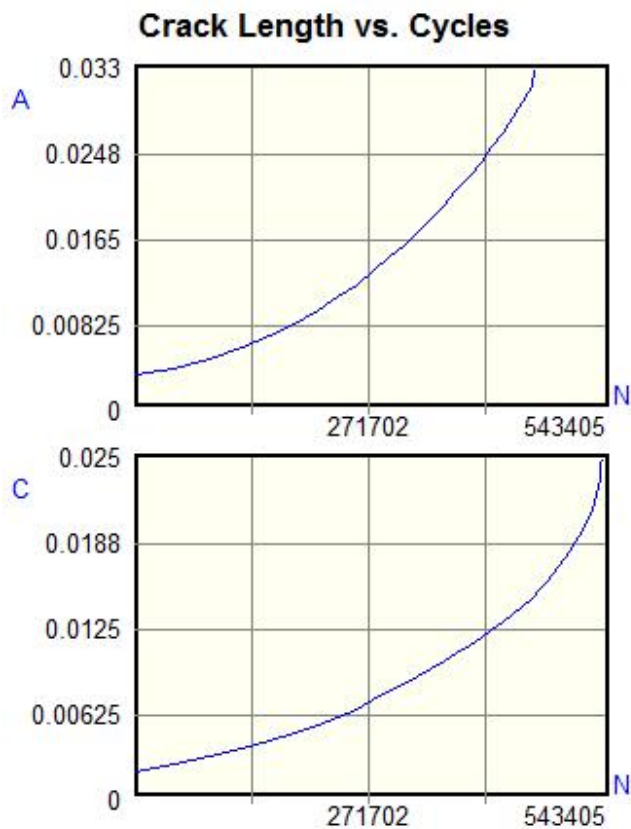
Slika 3.29. Inicijalna pukotina, P2

Grafički prikaz brzine širenja pukotine u ovisnosti o koeficijentu intenzivnosti naprezanja vidi se na slici (Slika 3.30.).



Slika 3.30. Ovisnost brzine širenja P2 o koeficijentu intenzivnosti naprezanja za zadani materijal

Simulirano propagiranje pukotine, mijenjanje njenih dimenzija, odvija se prema dijagramima A/N (Slika 3.31.).



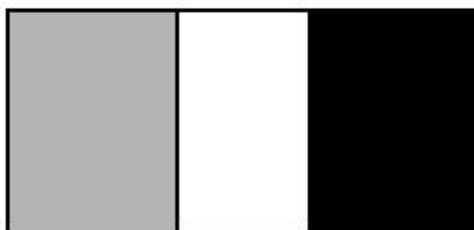
Slika 3.31. Dijagram povećanja dimenzija P2 u ovisnosti o broju ciklusa

Prikaz početka propagacije pukotine vidi se na slici (Slika 3.32.).



Slika 3.32. Početak propagacije P2

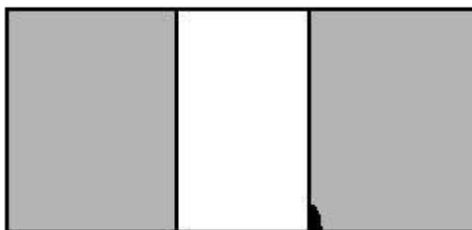
Sami početak propagacije pukotine odlikuje širenje duž provrta ovjesišta te takva propagacija traje do četvrtine ukupnog broja ciklusa. Nakon toga dolazi do širenja pukotine i u poprečnom smjeru, a na kraju do samog pucanja ovjesišta (Slika 3.33.).



Slika 3.33. Kraj propagacije P2, lom ovjesišta

Rezultati simulacije pokazuju da će do loma na mjestu simulirane pukotine doći nakon 5434. vožnje kabine pod punim opterećenjem.

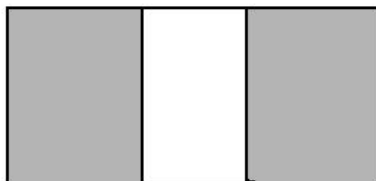
Ukoliko kabina vozi 180 dana u godini, a dnevno izvede 5 vožnji, može voziti slijedećih 6.03 godina. U roku od godine dana, što je ujedno i remontni interval, početna pukotina od 2 x 1 mm će propagirati na otprilike 4 x 3 mm (Slika 3.34.), a to je duljina koja će jasno biti vidljiva za vrijeme samog remonta.



Slika 3.34. Propagacija nakon godine dana u zadanom režimu vožnje, $a=4$ mm i $c=3$ mm

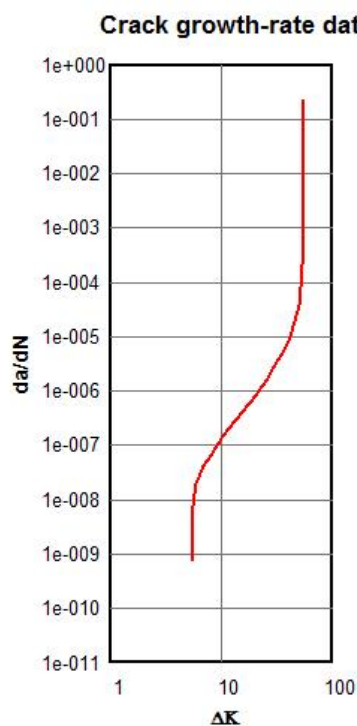
3.3.3. Inicijalna pukotina pravokutnog poprečnog presjeka u radijalnom smjeru

Odabrana je pukotina dimenzija $a=1$ mm i $c=2$ mm, na unutarnjem rubu ovjesišta, u daljnjem tekstu P3 (Slika 3.35.).



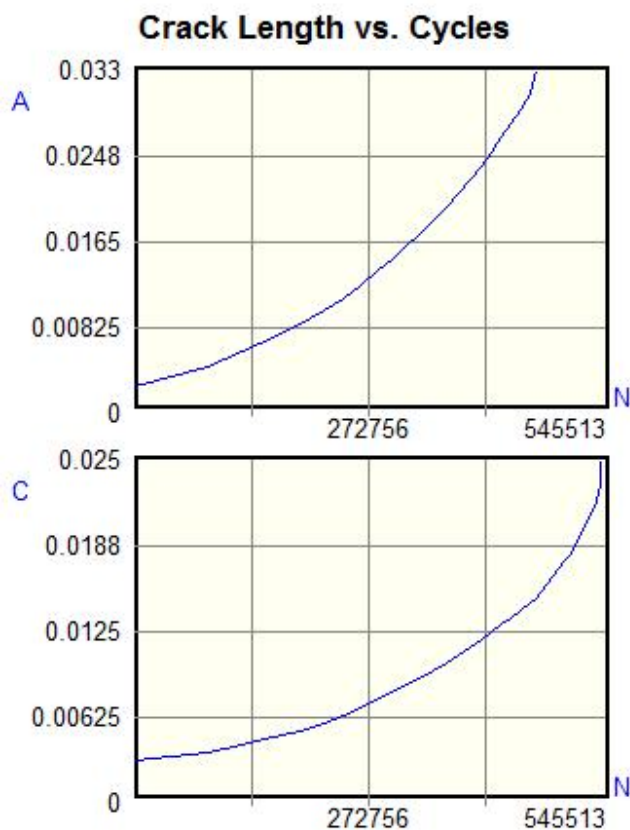
Slika 3.35. Inicijalna pukotina, P3

Grafički prikaz brzine širenja pukotine u ovisnosti o koeficijentu intenzivnosti naprezanja vidi se na slici (Slika 3.36.).



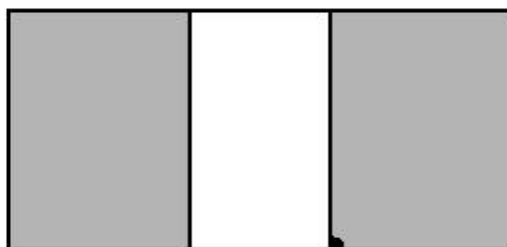
Slika 3.36. Ovisnost brzine širenja P3 o koeficijentu intenzivnosti naprezanja za zadani materijal

Simulirano propagiranje pukotine, mijenjanje njenih dimenzija, odvija se prema dijagramima A/N (Slika 3.37.).



Slika 3.37. Dijagram povećanja dimenzija P3 u ovisnosti o broju ciklusa

Prikaz početka propagacije pukotine vidi se na slici (Slika 3.38.).



Slika 3.38. Početak propagacije P3

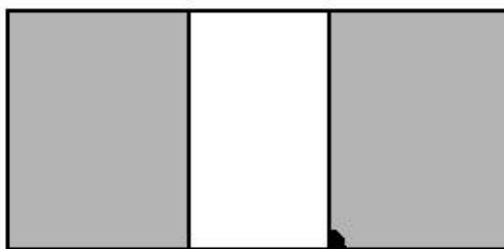
Sami početak propagacije pukotine odlikuje širenje duž provrta ovjesišta te takva propagacija traje do četvrtine ukupnog broja ciklusa. Nakon toga dolazi do širenja pukotine i u poprečnom smjeru, a na kraju do samog pucanja ovjesišta (Slika 3.39.).



Slika 3.39. Kraj propagacije P3, lom ovjesišta

Rezultati simulacije pokazuju da će do loma na mjestu simulirane pukotine doći nakon 5455. vožnje kabine pod punim opterećenjem.

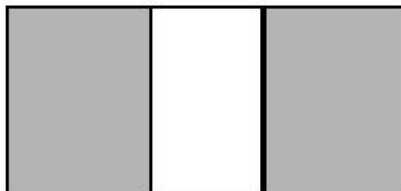
Ukoliko kabina vozi 180 dana u godini, a dnevno izvede 5 vožnji, može voziti slijedećih 6.06 godina. U roku od godine dana, što je ujedno i remontni interval, početna pukotina od 1 x 2 mm će propagirati na otprilike 4 x 3 mm (Slika 3.40.), a to je duljina koja će jasno biti vidljiva za vrijeme samog remonta.



Slika 3.40. Propagacija nakon godine dana u zadanom režimu vožnje, $a=4\text{ mm}$ i $c=3\text{ mm}$

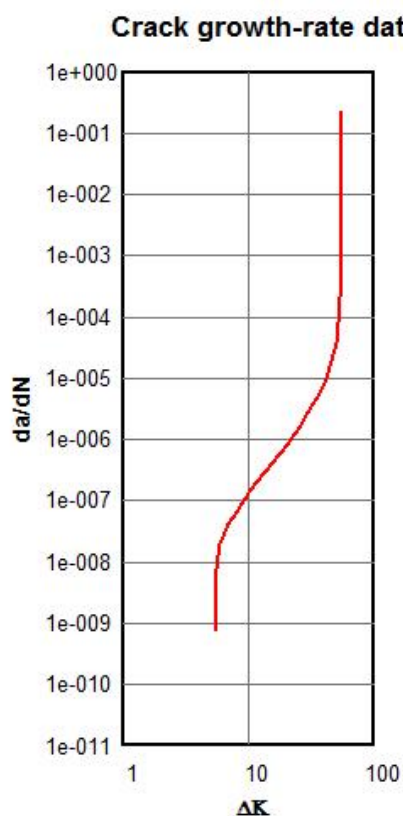
3.3.4. Inicijalna pukotina uzduž cijelog ruba provrta

Odabrana je pukotina dimenzija $c=1$ mm, na unutarnjem rubu, duž cijelog provrta ovjesišta, u daljnjem tekstu P4 (Slika 3.41.).



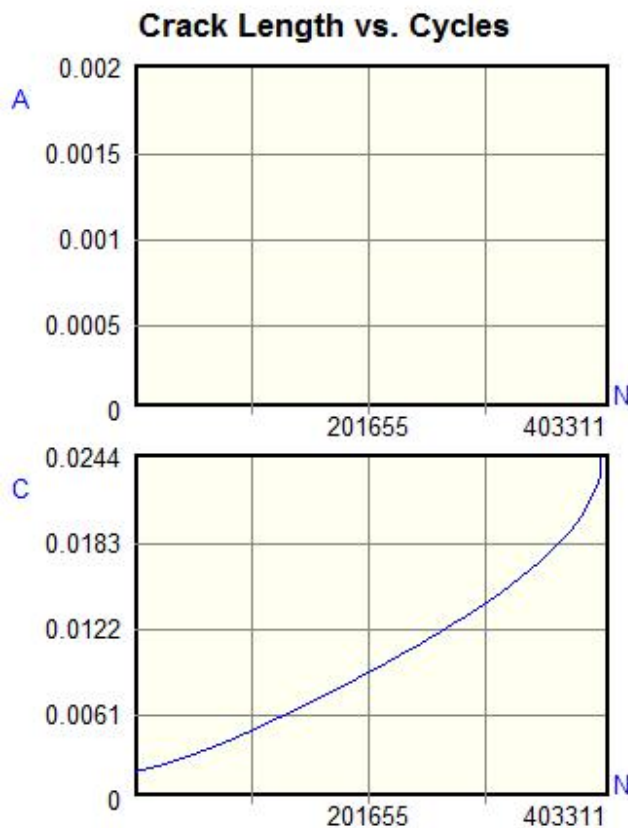
Slika 3.41. Inicijalna pukotina, P4

Grafički prikaz brzine širenja pukotine u ovisnosti o koeficijentu intenzivnosti naprezanja vidi se na slici (Slika 3.42.).



Slika 3.42. Ovisnost brzine širenja P4 o koeficijentu intenzivnosti naprezanja za zadani materijal

Simulirano propagiranje pukotine, mijenjanje njenih dimenzija, odvija se prema dijagramima A/N (Slika 3.43.).



Slika 3.43. Dijagram povećanja dimenzija P4 u ovisnosti o broju ciklusa

Prikaz početka propagacije pukotine vidi se na slici (Slika 3.44.).



Slika 3.44. Početak propagacije P4

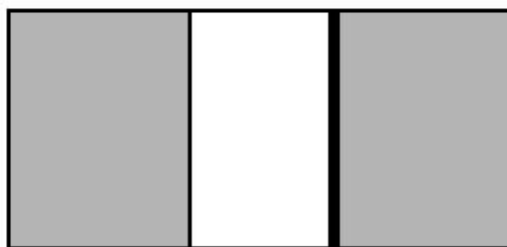
Propagacija pukotine odvija se u poprečnom smjeru, a na kraju dolazi do samog pucanja ovjesišta (Slika 3.45.).



Slika 3.45. Kraj propagacije P4, lom ovjesišta

Rezultati simulacije pokazuju da će do loma na mjestu simulirane pukotine doći nakon 4033. vožnje kabine pod punim opterećenjem.

Ukoliko kabina vozi 180 dana u godini, a dnevno izvede 5 vožnji, može voziti slijedećih 4.48 godina. U roku od godine dana, što je ujedno i remontni interval, početna pukotina od 1 mm će propagirati na otprilike 5 mm (Slika 3.46.), a to je duljina koja će jasno biti vidljiva za vrijeme samog remonta.



Slika 3.46. Propagacija nakon godine dana u zadanom režimu vožnje, $c=5$ mm

3.3.5. Realno opterećenje ovjesišta

Kod opterećenja kakva postoje za vrijeme stvarne eksploatacije, a za simulaciju je pretpostavljeno konstantno maksimalno opterećenje koje je 20% veće od stvarnog, do propagacije pukotine ne bi trebalo doći.

4. Zaključak

U ovom radu provedena je provjera pouzdanosti nosača kabine žičare simuliranjem statičkog opterećenja te simuliranjem nastanka fiktivnih pukotina na ovjesištu nosača kabine.

Naprezanja u nosaču kabine proračunata su metodom konačnih elemenata i zaključeno je da su u granicama koje su dopuštene za tu vrstu konstrukcije.

Simulacije pukotina pokazale su da se godišnjim redovitim pregledom (remontom) mogu izbjeći propagacije eventualne pukotine koja bi dovela do loma ovjesišta nosača. Pošto su same pretpostavljene pukotine veličine koje su zamjetljive pregledu golim okom, do puknuća ne bi trebalo doći.

5. Popis literature

- [1] Manual SOLIDWORKS
- [2] Prof. dr. sc. Jurica Sorić: Metoda konačnih elemenata, Golden marketing-Tehnička knjiga, Zagreb 2004.
- [3] Manual ALGOR
- [4] Prof. dr. sc. Mirko Husnjak: Mehanika loma, Skripta
- [5] Manual AFGROW
- [6] Prof. dr. sc. Mirko Husnjak: Izvještaj o ispitivanju pouzdanosti žičare